

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-279764

(43)Date of publication of application : 02.10.2003

(51)Int.Cl.

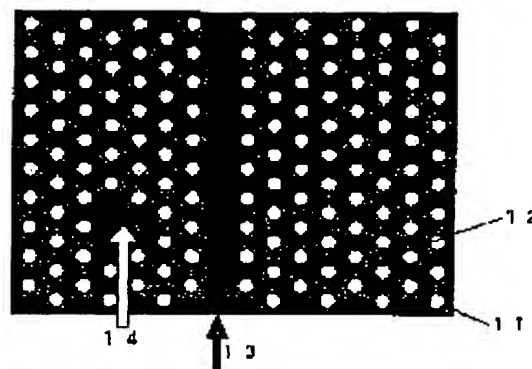
G02B 6/12

(21)Application number : 2002-086221 (71)Applicant : JAPAN SCIENCE &  
TECHNOLOGY CORP(22)Date of filing : 26.03.2002 (72)Inventor : NODA SUSUMU  
MOCHIZUKI MASAMITSU  
ASANO TAKU(54) TWO DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL OPTICAL MULTIPLEXER AND  
DEMULTIPLEXER

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical multiplexer and demultiplexer which can be downsized and has high efficiency and Q value.

SOLUTION: Two dimensional photonic crystal is made by placing an area 12 (a hole) of lower refractive index than the material of a body 11 in the slab body 11 cyclically. A waveguide 13 is formed by preventing the hole 12 from being set on the straight. A donor-typed cluster defect 14 is formed by preventing the hole 12 from being set at more than two lattice points in a place adjoining the waveguide 13. With such a structure, only a specific wavelength light among light transmitting the waveguide 13 resonates in the donor- typed cluster defect 14, captured and released outside (demultiplex), while in the donor-typed cluster defect 14 only the specific wavelength light is cast from outside into the waveguide 13 (multiplex).



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 18.07.2002

[Date of sending the examiner's decision of  
rejection]

[Kind of final disposal of application other  
than the examiner's decision of rejection or  
application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3459827

[Date of registration] 08.08.2003

[Number of appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of requesting appeal against  
examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

\* NOTICES \*

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

CLAIMS

---

[Claim(s)]

[Claim 1] a) A slab-like body and two or more bodies periodically arranged by the b above-mentioned body are the two-dimensional photograph nick crystall-luminescence part multiplexing machine characterized by to have the field where refractive indexes differ, the waveguide formed in the c above-mentioned body by preparing the defect of the above-mentioned different refractive-index field in a line, and the cluster defect which is established near the d above-mentioned waveguide, and which is formed of two or more adjoining defects.

[Claim 2] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 1 characterized by forming the above-mentioned cluster defect of two adjoining defects.

[Claim 3] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 1 characterized by forming the above-mentioned cluster defect of three defects which adjoin in the shape of a triangle.

[Claim 4] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 1 characterized by being formed of three defects in which the above-mentioned cluster defect adjoins in the shape of [ parallel to waveguide ] a straight line.

[Claim 5] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 4 characterized by preparing the above-mentioned cluster defect formed of three defects which adjoin in the shape of a straight line from the above-mentioned waveguide in eye 4 of the train of the above-mentioned different refractive-index field trains.

[Claim 6] a) [ in a slab-like body, two or more forbidden-band fields prepared in the b above-mentioned body, and c each forbidden-band field ] The field where a refractive index differs from two or more bodies periodically arranged by the body a different period for every forbidden-band field, d) Waveguide prepared so that it may be formed by establishing the defect of the above-mentioned different refractive-index field in each forbidden-band field at a line and may pass through all forbidden-band fields, e) Two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine characterized by having the punctiform defect established near the above-mentioned waveguide in each forbidden-band field.

[Claim 7] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 6 characterized by at least one of the punctiform defects prepared in each of two or more above-mentioned forbidden-band fields being the cluster defect formed of two or more adjoining defects.

[Claim 8] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 7 characterized by at least one of the punctiform defects prepared in each of two or more above-mentioned forbidden-band fields being the cluster defect formed of two adjoining defects.

[Claim 9] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 7 characterized by at least one of the punctiform defects prepared in each of two or more above-mentioned forbidden-band fields being the cluster defect formed of three defects which adjoin in the shape of a triangle.

[Claim 10] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 7 characterized by being the cluster defect formed of three defects in which at

least one of the punctiform defects prepared in each of two or more above-mentioned forbidden-band fields adjoins in the shape of [ parallel to waveguide ] a straight line.

[Claim 11] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 10 characterized by preparing the above-mentioned cluster defect formed of three defects which adjoin in the shape of a straight line from the above-mentioned waveguide in eye 4 of the train of the above-mentioned different refractive-index field trains.

[Claim 12] The defect of the above-mentioned different refractive-index field is a two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 1 to 11 characterized by establishing a different refractive-index field only in the part of 5% - 40% of range of the thickness of a body from one field of a body.

[Claim 13] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 12 characterized by the thickness of the above-mentioned different refractive-index field being 20% - 30% of the thickness of a body.

[Claim 14] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 1 to 13 with which the above-mentioned different refractive-index field is characterized by being the field where a refractive index is lower than a body.

[Claim 15] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 14 characterized by the above-mentioned low refractive-index field being a hole.

[Claim 16] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 15 characterized by the defect of the above-mentioned different refractive-index field being a donor mold defect formed by not establishing a hole in a body.

[Claim 17] The two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine according to claim 15 characterized by the defect of the above-mentioned different refractive-index field being an acceptor mold defect formed by preparing the hole where a path is larger than the above-mentioned hole.

---

[Translation done.]

**\* NOTICES \***

**JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.**

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

**DETAILED DESCRIPTION**

---

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the optical part multiplexing device used for wavelength division light multiplex communication etc.

[0002]

[Description of the Prior Art] In recent years, the photograph nick crystal attracts attention as an optical new device. A photograph nick crystal is an optical functional material with periodic refractive-index distribution, and band structure is formed to the energy of a photon. It is the description that the energy field (photograph nick band gap) whose propagation of light becomes impossible especially is formed.

[0003] The field of optical communication is taken up as an example of the field from which application of a photograph nick crystal is expected. In optical communication, wavelength division multiplexing (Wavelength Division Multiplexing : WDM) is used instead of the conventional light-hour division multiplex system (Optical Time Division Multiplexing : OTDM). This WDM is a communication mode which one transmission line is made to spread the light of two or more wavelength, and puts a separate signal on each. By this, the amount of information which can be transmitted to unit time amount improves by leaps and bounds.

[0004] In this wavelength division multiplexing, the light of each wavelength is mixed by the entrance side of a transmission line, and the mixed light is taken out for every wavelength by the outlet side. Therefore, the multiplexing machine and splitter, or wavelength filter of light is needed. Among these, as a splitter, the array waveguide diffraction grating (Arrayed Waveguide Grating : AWG) is used in the present condition. However, since the usual waveguide is used in AWG, in order to make loss of light small, in the present condition, the comparatively big component of several cm angle extent is used.

[0005] Then, attaining the miniaturization of the above-mentioned splitter is examined by using the device which consists of a photograph nick crystal as the above-mentioned splitter and a multiplexing machine (it indicates to JP,2001-272555,A.). Hereafter, it considers as the conventional technique 1. . The splitter which changes from a photograph nick crystal to below is described briefly. By introducing a defect suitable during a photograph nick crystal, the energy level (defective level) by this defect is formed into the above-mentioned photograph nick band gap. By this, the existence only of the light of the wavelength corresponding to the energy of defective level is attained among the wavelength range corresponding to the energy in the above-mentioned photograph nick band gap. If the above-mentioned defect under crystal is made into a line, it will become optical waveguide, and it will become an optical resonator if the defect under crystal is made into punctiform.

[0006] If the above-mentioned waveguide is prepared during a photograph nick crystal and the above-mentioned point defect is appropriately prepared in the near, the light of various wavelength will spread the inside of waveguide, and only the light of the wavelength which is in agreement with the resonance frequency of a point defect of them will be captured by the point defect. If the light is taken out, it will become the splitter of desired wavelength. On the contrary, if the light of the wavelength which is in agreement with resonance frequency is introduced in a photograph nick crystal from a point defect and the inside of waveguide is made to spread together with the light of

other various wavelength, it will become the multiplexing machine of desired wavelength.

[0007] A two-dimensional crystal or a three-dimension crystal can be used for the photograph nick crystal as a splitter and a multiplexing machine. Although the both have the features, respectively, below, a two-dimensional crystal with comparatively easy creation is described. As a two-dimensional photograph nick crystal, since a field and the difference of the big refractive index of the body of a crystal and air tend (the field direct direction) to cross at right angles, light can be shut up to the field direct direction.

[0008] In the above-mentioned conventional technique 1, the cylinder hole of the same diameter is periodically opened in the slab which consists of InGaAsP, it considers as optical waveguide by closing one train of the cylinder hole, a defect is introduced by differing the diameter of at least one cylinder hole from the diameter of other cylinder holes further, and the case where it is made into an optical resonator is examined.

[0009] According to it, a lattice constant  $a$  is set up according to the wavelength (1.55 micrometers which is one of the wavelength ranges generally used to wavelength division light multiplex communication in the above-mentioned example) of light to make it spread. And the radius of a cylinder hole established at each lattice point is set to  $0.29a$ . A point defect is formed there by setting the radius of one cylinder hole to  $0.56a$  among those. Then, the light of normalized radian frequency  $f = 0.273$  is emitted to the field right above down of slab from the point defect. The  $Q$  value at this time is set to about 500. Here, with normalized radian frequency, the frequency of light is multiplied by  $a/c$  ( $c$  is the velocity of light), and it considers as a non-dimension. so that  $Q$  value is a value which shows the effectiveness of a resonator and  $Q$  value is large -- wavelength -- resolution also becomes high. Moreover, when two or more point defects in which magnitude differs the radius of  $0.56a$  and one another cylinder hole from  $0.58a$  in the radius of one cylinder hole are formed, two sorts of light in which  $0.2729$  and  $0.2769$  differ [ normalized radian frequency ] from wavelength, respectively is emitted. Each  $Q$  value at that time is set to about 500.

[0010]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] Although it is shown that a two-dimensional photograph nick crystal can be used as an optical separator in the above-mentioned conventional technique 1 as stated in the top, it is necessary to make it improve further in respect of the following about the engine performance obtained there. First,  $Q$  value is described. In the above-mentioned conventional technique 1,  $Q$  value is about 500. the wavelength of the optical resonator in the light of this value to the wavelength  $\lambda$  -- resolution is called for by  $\lambda/Q$ . for example, the wavelength of the above-mentioned optical resonator in the wavelength of 1.55-micrometer band -- resolution is set to about 3nm. however -- in order to use for the optical communication of high density wavelength division multiplexing -- wavelength -- resolution must be made to about 0.8nm or less, and  $Q$  value must be made or more into about 2000. It is possible that loss of the luminous energy to the field direct direction increases by introducing a point defect as a failure factor over raising  $Q$  value in the conventional technique 1.

[0011] Vertical asymmetry may be introduced into a point defect in order to take out light only from the field of one side of a two-dimensional side (conventional technique 1). Moreover, although the light taken out from a circular point defect did not polarize, the light which carried out the linearly polarized light may be called for for the purpose, such as making it combine with external optical system. Then, in order to take out a polarization wave, the asymmetry of field inboard may be introduced into a point defect. However, the asymmetry of a point defect also becomes the cause that  $Q$  value falls.

[0012] It is in obtaining an optical part multiplexing machine with high effectiveness highly [  $Q$  value ] that this invention can be accomplished in order to solve such a technical problem, and the place made into the purpose can be miniaturized. Moreover, also when you obtain the case where vertical asymmetry is introduced, and a polarization wave, also let it be the purpose to obtain an optical part multiplexing machine with high effectiveness.

[0013]

[Means for Solving the Problem] The thing of the 1st mode of the two-dimensional photograph nick crystall luminescence part multiplexing machine concerning this invention accomplished in order to solve the above-mentioned technical problem a) In the field where a slab-like body differs in a

refractive index from two or more bodies periodically arranged by the b above-mentioned body, and the c above-mentioned body. It is characterized by having the waveguide formed by preparing the defect of the above-mentioned different refractive-index field in a line, and the cluster defect which is established near the d above-mentioned waveguide and which is formed of two or more adjoining defects.

[0014] Moreover, the thing of the 2nd mode of the two-dimensional photograph nick crystal luminescence part multiplexing machine concerning this invention a) [ in a slab-like body, two or more forbidden-band fields prepared in the b above-mentioned body, and c each forbidden-band field ] The field where a refractive index differs from two or more bodies periodically arranged by the body a different period for every forbidden-band field, d) It is formed by establishing the defect of the above-mentioned different refractive-index field in each forbidden-band field at a line, and is characterized by having the waveguide prepared so that it may pass through all forbidden-band fields, and the punctiform defect established near the above-mentioned waveguide in e each forbidden-band field.

[0015]

[Embodiment of the Invention] First, the 1st mode is explained. Compared with the magnitude of field inboard, the slab whose thickness is a sufficiently thin plate serves as a body of the two-dimensional photograph nick crystal luminescence part multiplexing machine of this invention. The field where a refractive index differs from a body on this body is arranged periodically. A photograph nick band gap is formed of existence of this periodic different refractive-index field, and it carries out by not making light with the energy within the limits of it exist. That is, the light of the wavelength range corresponding to it cannot pass a body.

[0016] Different refractive-index fields may be any of the thing which has a refractive index lower than a body, and a high thing. Generally, since the quality of the material with a refractive index high as a body is used in many cases, it is easy also from the point of ingredient selection to use the thing of the quality of the material with a refractive index low as a different refractive-index field.

[0017] Furthermore, as a low refractive-index field, what embedded the matter with a refractive index lower than a body in the body may be used, and only what only opened the hole in the body may be used. In the case of the latter, air serves as the above-mentioned different refractive-index field. In practice, since air is the quality of the material with the lowest refractive index, it is advantageous at the point that a refractive-index difference with a body can be enlarged. Moreover, it is easier to only prepare a hole rather than a manufacture top also embeds other matter.

[0018] Hereafter, the periodic point that a different refractive-index field is arranged is called the lattice point. Although various gestalten can be considered as an array of the lattice point, the shape of the shape of a tetragonal lattice or a triangular grid etc. is typical, for example.

[0019] In the photograph nick crystal which has such periodicity, periodicity is disturbed there by preparing a defect in the different refractive-index field of the one lattice point. By setting up the parameter of a defect appropriately, defective level is formed into a photograph nick band gap from turbulence of this periodicity, and the point that existence of light is allowed into the body with which existence of light is not allowed arises. This is called a point defect. By preparing such a defect in a line, the waveguide which light may pass can be formed into a body. This is called a line defect. The configuration of a line defect may have the shape of not only the shape of a straight line but the letter of crookedness, or a curve. Moreover, the width of face of a line defect may be a part for 1 of the train of the lattice point train, and may be a part for two or more trains.

[0020] As mentioned above, when a different refractive-index field is made into a hole, as the defect, what filled the hole with the matter of a body, i.e., thing \*\* which does not prepare a hole at the lattice point, is the most convenient. Of course, what enlarged the path of the hole serves as a defect. It is the donor mold defect which does not prepare a hole at the lattice point, and it is the acceptor mold defect which enlarged the path of a hole.

[0021] Here, a donor mold defect and an acceptor mold defect are explained. Although the refractive index explains in this invention since it is aimed at light including infrared radiation and ultraviolet rays, generally a photograph nick crystal is formed of the difference of a periodic dielectric constant. Therefore, a defect is formed into a body by differing the dielectric constant of one piece of the different dielectric constant field (lattice point) arranged periodically. What made what made the

dielectric constant the value higher than the dielectric constant of the usual lattice point the donor mold defect and the low value is called an acceptor mold defect. As mentioned above, since the defect in which a hole is periodically arranged in the body produced by a certain matter, and a hole is established in one of points [ them ], and there is nothing to them (it buries by the body matter) is making the dielectric constant of the lattice point higher than air, it is a donor mold defect. On the contrary, since it is making the dielectric constant of the lattice point low, it is an acceptor mold defect to enlarge the path of the hole of one point.

[0022] With the defect which consists only of the one lattice point, a defect with the property of another \*\* is formed by making the two or more adjoining lattice points which are near the waveguide among different refractive-index fields into a defect. Henceforth, the defect which consists only of the one lattice point is called a "point defect." The defect indicated by the conventional technique 1 is this point defect. The defect used in the 1st mode of the invention in this application to it is a defect formed of the two or more adjoining lattice points. This is called a "cluster defect." Moreover, a "point defect" and a "cluster defect" are generically called a "punctiform defect." This is used in the 2nd below-mentioned mode.

[0023] In such a configuration, desired defective level is formed into a photograph nick band gap of a cluster defect by setting up appropriately parameters, such as the number of the lattice point contained in one cluster defect, a location (distance from waveguide) of an array and a cluster defect, or the lattice constant  $a$  of a body. And only the light of the wavelength corresponding to the energy of defective level resonates in a defective location among the light of various wavelength which passes waveguide. The light which resonated is emitted in the field direct direction of a photograph nick crystal. What is necessary is just to choose the energy of defective level appropriately by adjusting the above-mentioned various parameters, in order to obtain the light of desired wavelength.

[0024] In the case of the cluster defect which has arranged two or more defects in the shape of a straight line, and formed them, polarization of the cross direction of a cluster defect is acquired in a defective location.

[0025] If the asymmetry of the field direct direction is conferred upon the configuration of a cluster defect, the output of the light to which a two-dimensional photograph nick crystal is outputted up and down can be made unsymmetrical. As an approach for conferring asymmetry, how to make it into the defect of a different refractive-index field can be considered by establishing a different refractive-index field in a part of thickness of a body from one field of a body. As range of the thickness, 20 - 30% is especially desirable 5% to 40% like the after-mentioned.

[0026] In order to confer the asymmetry of the field direct direction upon the configuration in the case of a cluster defect, it is not necessary to depend on the asymmetry in each lattice point as mentioned above. For example, the above-mentioned actuation (a low refractive-index field is established only in one field) may be carried out to one middle point of the two lattice points to the cluster defect which changes from the two adjoining lattice points.

[0027] Although the operation as a splitter was described so far, the above-mentioned configuration can also be used as a multiplexing machine. If the light of the wavelength corresponding to the energy of defective level is introduced into the location of a cluster defect, it will be multiplexed in the light of the above-mentioned wavelength by the light which flows waveguide.

[0028] By arranging two or more cluster defects in which the number and the array of the lattice point differ from each other, part multiplexing of the light of two or more sorts of different wavelength can also be carried out.

[0029] Next, the 2nd mode is explained. In the 1st mode, by changing the number of the lattice point and arrangement which establish a defect showed that the wavelength of the light which carries out part multiplexing was changeable. And it was said that a hole is advantageous as a different refractive-index field, and the donor mold defect in which the hole is not prepared as a defect is advantageous. However, such a donor mold defect has few degrees of freedom of wavelength change than the acceptor mold defect formed by enlarging the path of a hole. It is because a donor mold defect only buries the lattice point by the body matter to the ability of this to change the magnitude of a hole to arbitration by the acceptor mold defect and there is no degree of freedom of such change. Although the degree of freedom of changing the number of the lattice points contained in it by using



a donor mold defect as a cluster type according to the 1st mode of above-mentioned this invention or the gestalt of arrangement is produced, the width of face of a degree of freedom is still restricted. Such a problem in a donor mold cluster defect is solved by the 2nd mode of this invention. It is described in detail below.

[0030] In case the 2nd mode of this invention allots a different refractive-index field to a body, it divides a body into the field of the same number as the number of the classes of wavelength which carries out part multiplexing. Henceforth, this field is called a forbidden-band field. And the above-mentioned different refractive-index field is arranged a different array period for every forbidden-band field.

[0031] The point that it is desirable being formed of the quality of the material with a refractive index lower than a body as for a different refractive-index field, and what is formed of air (that is, it is a hole) is more desirable is the same as that of the 1st mode.

[0032] In order to pass light through each forbidden-band field and to multiplex, the waveguide passing through all the above-mentioned forbidden-band fields is formed like the 1st mode.

Furthermore, the punctiform defect for part multiplexing is formed in each of the above-mentioned forbidden-band field. A "punctiform defect" includes the point defect which consists only of the one lattice point, and the cluster defect which consists of point defects which plurality adjoins as above-mentioned. It is made for the punctiform defects prepared in each forbidden-band field to differ in resonant wavelength mutually. Therefore, the two-dimensional photograph nick crystal luminescence part multiplexing machine which consists of n forbidden-band fields carries out part multiplexing of the light of n kinds of wavelength. Thus, the structure which prepared two or more forbidden-band fields is called terrorism structure to one two-dimensional photograph nick crystal into a field.

[0033] The array period and punctiform defect of a different refractive-index field in each forbidden-band field are set up corresponding to the wavelength of the light which carries out part multiplexing. Also let the ratio of the different refractive-index area size for every forbidden-band field be the same ratio as the array period of the different refractive-index field for every set-up forbidden-band field. If the cluster defect of the same configuration as each forbidden-band field is arranged, each cluster defect will carry out part multiplexing of the different wavelength by the difference in the array period of the different refractive-index field for every forbidden-band field. Of course, the cluster defect of the different number of the lattice points for every forbidden-band field or a configuration may be arranged. To a cluster defect, the various defects of the 1st mode are usable.

[0034] Although developed for the purpose of especially the 2nd mode of this invention enlarging a degree of freedom in the case of the donor mold defect in which the hole which is the periodic structure of a body is not prepared, this configuration itself can be applied also to an acceptor mold, and it has an advantage peculiar to it. That is, although two or more holes where paths differ were conventionally introduced in the body of one sheet when it was going to carry out part multiplexing of the light of two or more sorts of different wavelength using the acceptor mold point defect formed by enlarging the diameter of a hole of the one lattice point, there was a problem that Q value fell by this. In order to avoid the fall of this Q value, the 2nd mode of this invention is suitably applicable. That is, a different refractive-index field is arranged an array period which is different to a different forbidden-band field corresponding to the wavelength of the light which carries out part multiplexing. Also let the ratio of the different refractive-index area size for every forbidden-band field, and magnitude of the acceptor mold point defect arranged for every forbidden-band field be the same ratios as the ratio of the array period of the different refractive-index field for every set-up forbidden-band field. Thereby, it becomes possible to carry out part multiplexing of the light of two or more wavelength, without causing the fall of Q value.

[0035]

[Effect of the Invention] By introducing the cluster defect of the 1st mode of the above, a splitter and a multiplexing machine with Q value higher than the case where the point defect which consists only of the one lattice point is used can be obtained. This is because the effective refractive index in the perimeter of a defect becomes high, light shuts up and effectiveness improves by forming a cluster defect. Moreover, also when obtaining the case where vertical asymmetry is introduced, and a

polarization wave, an optical part multiplexing machine with high effectiveness can be obtained.  
 [0036] By introducing terrorism structure into the field of the 2nd mode of the above, when a donor mold cluster defect is used, each wavelength at the time of carrying out part multiplexing of the light of two or more wavelength can be set up with a high degree of freedom. Moreover, the Q value at that time is hardly different from the Q value of the photograph nick crystal which carries out part multiplexing of the light of one kind of wavelength. If the 2nd mode is constituted using the donor mold cluster defect with high Q value of the 1st mode, the equipment which has high Q value and carries out part multiplexing of the wavelength of light can be produced comparatively easily. Moreover, the 2nd mode is effectively applicable also to an acceptor mold defect.

[0037]

[Example] (1) the 1st voice -- example (1-1) \*\*\*\* [ like ] -- first -- the 1st voice -- take up a two-dimensional photograph nick crystal as typically shown in drawing 1 as an example [ like ]. It is the slab (body) 11 which was expressed with tabular to drawing 1 . When the infrared radiation with a wavelength of  $\lambda = 1.55$  micrometers used for optical communication is considered, transparent InGaAsP can be used for slab 11 to it. As with a circle [ white ] shows there, the hole 12 which is a different refractive-index field (low refractive-index field) is arranged periodically. Although drawing 1 shows the example which allotted the hole 12 in the shape of a triangular grid, various tetragonal lattice-like etc. arrangement can be considered.

[0038] Waveguide 13 is formed by not establishing a hole in a line continuously in the part shown by the arrow head of the continuous line of drawing 1 . The donor mold cluster defect 14 is formed by not preparing a hole in the part furthermore shown by the white arrow head at two or more lattice points. On drawing, since it is expressed that the lattice point which consists of holes was buried by the body matter, below, it may express constituting a donor mold cluster defect, saying "The lattice point is buried."

[0039] Although the example of the donor mold cluster defect in which the 3 lattice points were buried in drawing 1 was shown, the configuration of various donor mold cluster defects as shown in drawing 2 can be considered. The configuration at the time of burying the 2-3 lattice points was shown in drawing 2 . Although not shown in drawing, the donor mold cluster defect in which the 4 or more lattice points were buried is also possible. Three kinds of configurations are shown about the case where the three lattice points are buried. Among these, what is located in a line on a "triangle-like defect" and a straight line in that to which the three lattice points which constitute a defect are located in a line with a triangle will be called a "straight-line-like defect." In addition, the donor mold defect (donor mold point defect) which consists of the one lattice point for a comparison was also shown in drawing 2 .

[0040] (1-2) Confirm whether part multiplexing of the light can actually be carried out by the check above-mentioned configuration of being able to part[ optical ]-multiplex. Therefore, the wavelength range of the light in the photograph nick band gap which waveguide lets pass is investigated first, and it investigates whether next, defective level is formed of a donor mold defect into the wavelength range of the light. As the means, the analysis technique called a two-dimensional plane wave unfolding technique was used.

[0041] A plane wave unfolding technique is an approach of expressing the light which spreads the space in which dielectric constant distribution has periodic structure as composition of a plane wave. Considering the TE mode to which electric field vibrate to field inboard, and a field vibrates in the field direct direction, an equation is [0042] about a field like the electromagnetic method of a maxwell.

[Equation 1]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} \frac{\partial H_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} \frac{\partial H_z}{\partial y} \right] + \frac{\omega^2}{c^2} H_z = 0 \quad (1)$$

It is expressed. The field ( $H_x, H_y, H_z$ ) of the direction of  $z$  [ can set  $\omega$  to the angular frequency of light and /  $H_z = H_z / (x, y, \omega)$  ] within a field and  $c$  are the velocity of light here. Moreover,  $\epsilon_r(\mathbf{r})$  expresses a periodic dielectric constant here. When the fourier expansion into series of the  $\epsilon_r(\mathbf{r})$  is carried out and  $H_z(x, y, \omega)$  is developed by Bloch's theorem, it is [0043], respectively.

[Equation 2]

$$\frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} = \sum_{\mathbf{G}} \kappa(\mathbf{G}) \exp\{j\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}\}$$

$$H_z(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \exp\{j(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}\} \quad (2)$$

It becomes. However,  $\mathbf{k}$  is a wave number vector and  $\mathbf{G}$  is reciprocal vectors. Moreover,  $\kappa(\mathbf{G})$  and  $h(\mathbf{k}, \mathbf{G})$  are expansion coefficients, respectively. It is [0044], when a formula (2) is substituted for a formula (1) and it solves about  $h(\mathbf{k}, \mathbf{G})$  to  $\mathbf{G}$  of arbitration.

[Equation 3]

$$\sum_{\mathbf{G}'} (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}') \kappa(\mathbf{G} - \mathbf{G}') h(\mathbf{k}, \mathbf{G}') = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \quad (3)$$

It becomes. Therefore, if specific wave number vector  $\mathbf{k}$  is given, 2 will be calculated as characteristic value ( $\omega/c$ ) and a corresponding frequency, i.e., corresponding energy, will become settled. Photograph nick band structure is calculated by asking for the frequency  $\omega$  corresponding to various wave number vector  $\mathbf{k}$ .

[0045] The result of having calculated the frequency domain which spreads waveguide about the TE mode is shown in [drawing 3](#) to the two-dimensional photograph nick crystal which has waveguide first and does not have a point defect using a formula (3). In addition, the right figure of [drawing 3](#) expands a part of left figure. From [drawing 3](#), although two trapped modes, zero-order mode (black dot in drawing) and the primary mode (this \*\*\*\*), can be spread, it is thought from balance with the system of that it is a single mode and the exterior that the zero-order mode is more efficient.

Moreover, rather than the continuous line described as the "traffic line" all over drawing, it combines with the mode which has the same wave number within a field on the same frequency which exists in free space, the light by the side of a RF begins to leak in the vertical direction, and propagation effectiveness falls. As mentioned above, the light of the range of normalized radian frequency 0.267-0.280 shown in the right figure of [drawing 3](#) as the black dot and the thin continuous line is considered to spread the waveguide concerned most efficiently. What is necessary is in other words just to determine a lattice constant  $a$  that the frequency of a desired light will go into the range of normalized radian frequency 0.267-0.280. For example, when InGaAsP is used as the quality of the material of a body and it calculates as a thing using light with a wavelength of 1.55 micrometers, a lattice constant  $a$  is understood [ 0.42-0.43 micrometers, then ] are good from the range of the above-mentioned normalized radian frequency.

[0046] Defective level was calculated, respectively about the cluster defect buried what buried the two lattice points among the defects shown in [drawing 2](#), and the three shape of the shape of a triangle, and a straight line. Moreover, it calculated also about the donor mold point defect which buried only the one lattice point for the comparison. Those results are shown in [drawing 4](#) - [drawing 7](#). First, in the case of the donor mold point defect which is an example of a comparison, since defective level is not formed like [drawing 4](#) between frequency-domain 0.267  $c/a$  which spreads the above-mentioned waveguide - 0.280  $c/a$  (an available frequency region is called henceforth), it cannot use as a part multiplexing machine.

[0047] In the case of the cluster defect which buried the two adjoining lattice points to it, since only one defective level is formed in an available frequency region like [drawing 5](#), it can use as a part multiplexing machine. Like [ in the case of the cluster defect which buried the three lattice points in the shape of a triangle ] [drawing 6](#), the defective level which is at the normalized-radian-frequency 0.268 neighborhood although two or more formation is carried out has single defective level in an available frequency region, and since spacing with the defective level by the side of a RF is separated from it enough, it can use as a part multiplexing machine. In the case of the cluster defect which buried the three lattice points in the shape of [ parallel to waveguide ] a straight line, since only one defective level is formed in an available frequency region like [drawing 7](#), it can use as a part multiplexing machine.

[0048] When the two adjoining lattice points when it became clear that it can use as a part multiplexing machine in the above are buried, and the three lattice points are buried in the shape of a

triangle, the result of having calculated electromagnetic-field distribution is shown in drawing 8 and drawing 9 about the case where the three lattice points are buried in the shape of [ parallel to waveguide ] a straight line. In this drawing, an arrow head shows the electric field vector of a direction parallel to a drawing, and the shade of a color shows the amplitude of the field of a direction perpendicular to a drawing. When the two lattice points are buried, and when the three lattice points are buried in the shape of a straight line, the light which resonates in the defect concerned is the mode which is spread in the buried lattice point train. Moreover, it is thought that the electric field of a direction perpendicular to the buried lattice point train are strong, and have a property near the linearly polarized light. Resonance mode which is spread toward each top-most vertices on the other hand from a triangular center of gravity when the three lattice points are buried in the shape of a triangle is shown, the symmetric property of electromagnetic-field distribution is high, and when polarizability is the above-mentioned two, it is thought that it is not [ like ] large.

[0049] (1-3) Q value was calculated about calculation of Q value, next three cases taken up in the last paragraph. At that time, frequency dependent [ in near defective level ] was calculated about the reinforcement of the electromagnetic wave emitted using the time domain finite difference method (KS.Yee, "IEEE Trans.Antennas Propagat." AP-14 volume 302 - 307 pages) by the algorithm of Yee, and Q value was calculated from the peak intensity and full width at half maximum.

[0050] The Q value in a two-dimensional photograph nick crystal is decided by  $Q_s$  showing association with  $Q_p$  showing association with a point defect and waveguide, and a point defect and the exterior (outside of a field). Among these,  $Q_p$  is decided by distance of a point defect and waveguide. Then, in order to investigate the difference in the Q value by the class of point defect, the distance of a point defect and waveguide was first assumed to be infinite, and it calculated about  $Q_s$ . Consequently, it was set to  $Q_s=5215$ , when the two lattice points were buried,  $Q_s=1354$  and the three lattice points were buried in the shape of a triangle and  $Q_s=2529$  and the three lattice points were buried in the shape of a straight line. On the other hand, it was 924 when  $Q_s$  was similarly calculated about the acceptor mold point defect of the conventional technique 1.

[0051] Consequently, it is expected that the Q value of a donor mold cluster defect will improve rather than that of an acceptor mold point defect, and the case where the three lattice points are buried in the shape of a straight line also especially in it is most expected to become high for Q value. Then, the result of having searched for the distance dependency between point defect-waveguides of  $Q_s$  and  $Q_p$  is shown in drawing 10 about the case where the three lattice points are buried in the shape of a straight line. The axis of abscissa of drawing 10 expresses the distance of the train and waveguide which buried the lattice point in the shape of a straight line by making the number of the trains of a hole into a unit here. Since Q value is calculated by  $1/Q=1/Q_s+1/Q_p$  using  $Q_s$  and  $Q_p$ , Q value is calculated like drawing 11 from drawing 10. Q value is set to 2012-4666, and its each is improving more sharply than Q value -500 of the conventional technique 1.

[0052] According to drawing 11, Q value becomes large as the distance of a point defect and waveguide increases. However, since the light which reaches a point defect decreases in the case of a splitter, and the light which reaches waveguide will decrease when it is a multiplexing machine if the distance becomes large too much, as a part multiplexing machine, it is inconvenient. Then, in consideration of the balance of Q value and an exchange of the light between point defect-waveguides, it is necessary to choose the above-mentioned distance appropriately. It is thought at the time of  $Q_p=Q_s$  that it is the most efficient. The case where eye four trains has a point defect by the number of hole trains from waveguide is the closest to this condition than drawing 12.

[0053] Although the effectiveness as a part multiplexing machine was considered in the last paragraph, it is intentionally large in  $Q_p$ , and if  $Q_s$  is made small, it can also use as a wavelength detection device which takes out slightly the light of specific wavelength which flows waveguide, and carries out a monitor.

[0054] (1-4) As the polarization property (1-2) described, when the two lattice points are buried, and when the three lattice points are buried in the shape of a straight line, it is expected that the linearly polarized light nature of emission light will be high. Then, the polarization property of emission light was calculated about the case where the three lattice points are buried in the shape of a straight line. The result is shown in drawing 13. The axis of abscissa of drawing 13 is the include angle of the field inboard to the train of the buried lattice point, and an axis of ordinate corresponds to the

amplitude of the light in the include angle. In the direction whose above-mentioned include angle is 0 degree, the amplitude is almost set to 0 and the amplitude becomes max in the direction whose above-mentioned include angle is 90 degrees. That is, it turns out that it is polarizing in a direction perpendicular to the train of the buried lattice point strongly.

[0055] (1-5) The point defect was made into the vertical symmetry in the field direct direction beyond control of the vertical output rate in a donor mold cluster defect. That is, the case where all the matter of a low refractive index in the 1 lattice point was buried was considered. In this case, light is emitted for the vertical direction of a field from a point defect.

[0056] Here, it calculated about the case where vertical asymmetry like drawing 14 is put into the configuration of a donor mold cluster defect. The example of drawing 14 sets thickness of a body to  $0.6a$ , buries the three lattice points in the shape of a straight line, and opens the hole of radius  $r=0.29a$  and depth  $h (<0.6a)$  in the middle (two places) of each buried lattice point. The count result about the relation between  $h/a$  and a vertical power ratio of having standardized the depth with the lattice constant is shown in drawing 15. Asymmetry is looked at by the up-and-down output of a defect in the range of  $h/a$  (0.05-0.4) shown in this drawing. It turns out that about 2 or so-time vertical power ratio is especially obtained for  $h/a$  in 0.2-0.4. Moreover, the relation between  $h/a$  and  $Q$  value is shown in drawing 16. Although the fall of  $Q$  value was seen in the field where a vertical power ratio is large,  $Q$  value higher than the conventional technique 1 was still obtained.

[0057] (2) As an example of the 2nd mode of an example of the 2nd mode, the example of a configuration of terrorism structure is shown in drawing 17 into a field. This drawing expresses terrorism structure into the field which consists of two forbidden-band fields. Bordering on the alternate long and short dash line of the center of drawing, the crystal whose array period of a hole (low refractive-index matter) is  $a_1$ , and the crystal this period of whose is  $a_2$  are joined and constituted. Hereafter, the 1st forbidden-band field and an array period call [ an array period ] the forbidden-band field of  $a_2$  the 2nd forbidden-band field for the forbidden-band field of  $a_1$ . The diameter of a hole [ in / for the diameter of the hole in the 1st forbidden-band field /  $b_1$  and the 2nd forbidden-band field ] is set to  $b_2$ . The waveguide of the both sides of an alternate long and short dash line is placed neatly on the same straight line. The donor mold cluster defect of the same configuration as the 1st forbidden-band field and the 2nd forbidden-band field is formed. In the above configuration,  $a_1/a_2$  and  $b_1/b_2$  are made equal. Since the magnitude of a donor mold cluster defect is decided by the array period of a hole, its ratio of the magnitude of the donor mold cluster defect of the 1st forbidden-band field and the magnitude of the donor mold cluster defect of the 2nd forbidden-band field donor mold cluster defect is also equal to  $a_1/a_2$ .

[0058] In addition, although the example of a donor mold cluster defect was shown here, an acceptor mold point defect as shown in drawing 18 is sufficient as a point defect. In this case, one acceptor mold point defect of a diameter  $c_1$  is prepared in the 1st forbidden-band field, and one acceptor mold point defect of a diameter  $c_2$  is prepared in the 2nd forbidden-band field. All of  $a_1 / 1 / c_1$  [  $b_2$  and ]/ $c_2$  are made equal. [  $a_2$  and  $b_1$  ]

[0059] When  $a_1$  and  $a_2$  were equal about the structure of drawing 17 and drawing 18, and  $a_1$  was larger than  $a_2$  1%,  $Q$  value was calculated about the case where  $a_1$  is smaller than  $a_2$  1%. The difference in \*\*1% and a total of 2% of structure is equivalent to the difference in a 30nm resonance wavelength in 1.55-micrometer band here. It was referred to as  $b_1=0.29a_1$ ,  $b_2=0.29a_2$ ,  $c_1=0.54a_1$ , and  $c_2=0.54a_2$  in this count. The count result of  $Q$  value is shown in drawing 19. In drawing 17 and drawing 18,  $(1-a_2/a_1)$  was defined as structure rate of change, and it was used by them. When a donor mold cluster defect is used,  $Q$  value is set to 2885-2891, and the sufficiently big value is acquired. When an acceptor mold point defect was used, the value comparable as the  $Q$  value of the two-dimensional photograph nick crystal of the acceptor mold of the conventional technique 1 was acquired. The fall of the big  $Q$  value by the difference in structure is not seen.

[0060] (3) the 1st and 2nd voice of this invention -- about the manufacture approach of the example two-dimensional photograph nick crystal of the manufacture approach of a two-dimensional photograph nick crystal [ like ], the manufacture approach in the case of using air as low refractive-index matter is indicated by [0037] - [0044] of JP,2001-272555,A about the above-mentioned conventional technique 1. First, the approach is explained briefly (see the above-mentioned official report for details). On a substrate, the crystal of the quality of the material of the slab used as a body

is grown up, and slab is formed. InGaAsP can be used for the quality of the material of slab when the wavelength range of the target light is a 1.55-micrometer band. By applying a photoresist on the field of slab and irradiating an electron ray, the low refractive-index matter and the pattern corresponding to an acceptor mold point defect are drawn. The low refractive-index matter and an acceptor mold point defect are formed by carrying out vapor etching of the field.

[0061] In manufacturing the two-dimensional photograph nick crystal of the 1st mode of this invention, in case a pattern is drawn, in the above-mentioned manufacture approach, it introduces a donor mold cluster defect into the part which arranges a donor mold cluster defect by not irradiating an electron ray. Moreover, what is necessary is just to draw the pattern corresponding to it, also when introducing terrorism structure into the field of the 2nd mode of this invention.

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

## DESCRIPTION OF DRAWINGS

---

### [Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] The mimetic diagram of a two-dimensional photograph nick crystal with a donor mold cluster defect which is the 1st mode of this invention.

[Drawing 2] The mimetic diagram showing the example of a configuration of a donor mold cluster defect.

[Drawing 3] Drawing showing the frequency band of the light which guides waveguide.

[Drawing 4] The graph which shows the defective level by the donor mold cluster defect in which the one lattice point was buried.

[Drawing 5] The graph which shows the defective level by the donor mold cluster defect in which the two lattice points were buried.

[Drawing 6] The graph which shows the defective level by the donor mold cluster defect in which the lattice point was buried in the shape of [ three ] a triangle.

[Drawing 7] The graph which shows the defective level by the donor mold cluster defect in which the lattice point was buried in the shape of [ three ] a straight line.

[Drawing 8] The graph which shows the electromagnetic-field distribution in the perimeter of the donor mold cluster defect in which the two lattice points were buried.

[Drawing 9] The graph which shows the electromagnetic-field distribution in the perimeter of the donor mold cluster defect in which the three lattice points were buried.

[Drawing 10] The graph which shows a defective location and the relation between  $Q_p$  and  $Q_s$ .

[Drawing 11] The table showing the relation between a defective location and  $Q$  value.

[Drawing 12] The graph which shows a defective location and the relation of  $Q_p/Q_s$ .

[Drawing 13] The graph which shows the polarization property of the donor mold cluster defect in which the lattice point was buried in the shape of [ three ] a straight line.

[Drawing 14] the upper and lower sides -- the mimetic diagram showing the example of a configuration of an unsymmetrical donor mold cluster defect.

[Drawing 15] The graph which shows depth  $h$  of the hole which was able to be opened in the point defect, and the relation of the vertical power ratio of light.

[Drawing 16] The graph which shows the relation between depth  $h$  of the hole which was able to be opened in the point defect, and the  $Q$  value of a resonator.

[Drawing 17] The mimetic diagram showing an example of terrorism structure into the field which has an acceptor mold point defect.

[Drawing 18] The mimetic diagram showing an example of terrorism structure into the field which has a donor mold cluster defect.

[Drawing 19] The table showing the relation between terrorism structure and  $Q$  value into a field.

### [Description of Notations]

11 -- Body

12 -- Hole

13 -- Waveguide

14 -- Donor mold cluster defect

15 -- Acceptor mold point defect

---

[Translation done.]



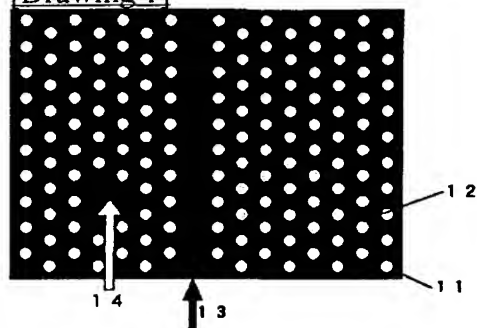
## \* NOTICES \*

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

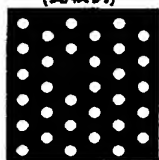
## DRAWINGS

[Drawing 1]

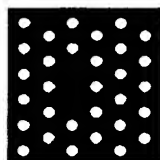


[Drawing 2]

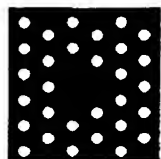
1 格子点を埋めた場合  
(比較例)



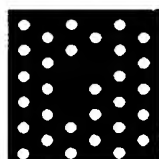
2 格子点を埋めた場合



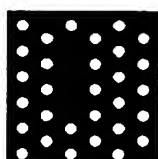
3 格子点を埋めた場合



パターン1  
三角形状欠陥

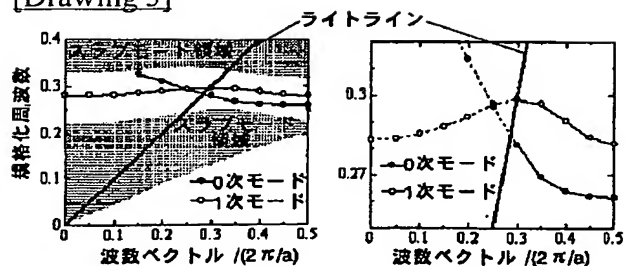


パターン2

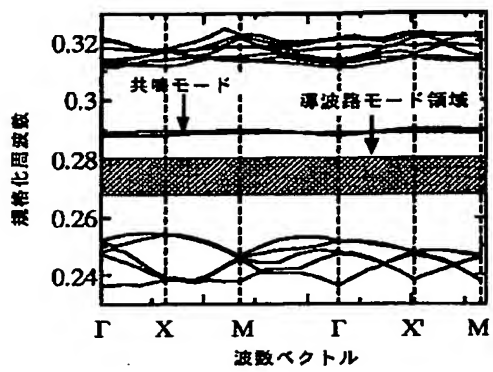


パターン3  
直線状欠陥

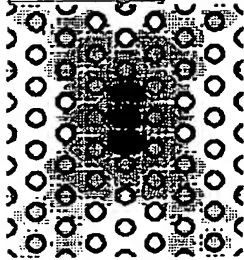
[Drawing 3]



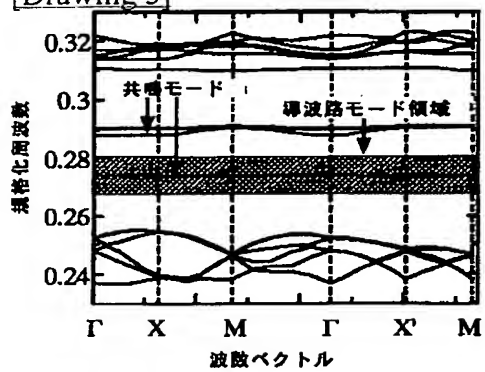
[Drawing 4]



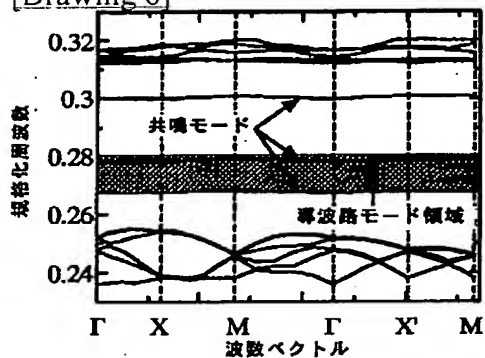
[Drawing 8]



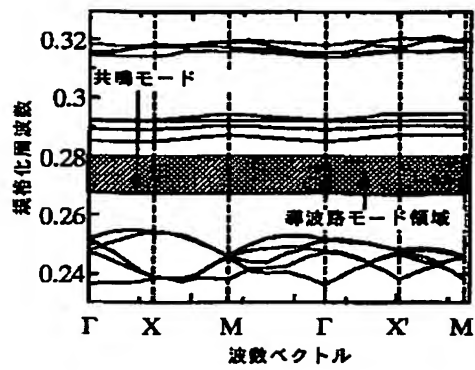
[Drawing 5]



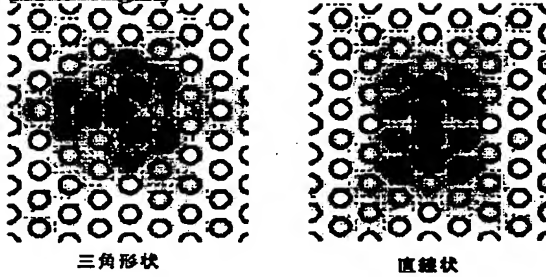
[Drawing 6]



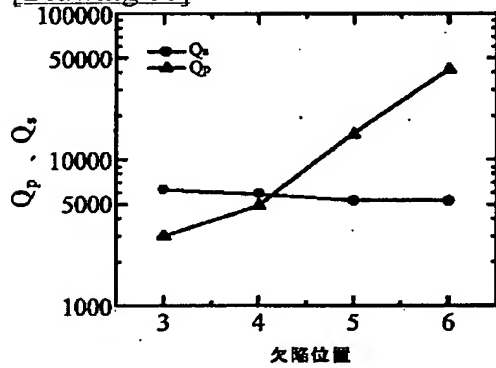
[Drawing 7]



[Drawing 9]



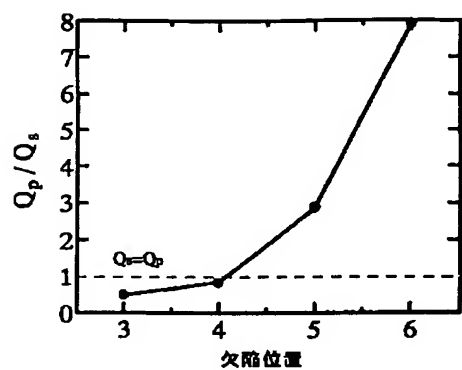
[Drawing 10]



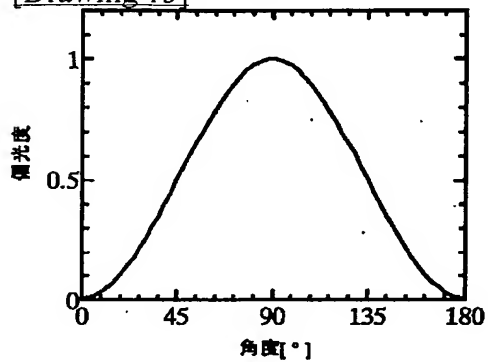
[Drawing 11]

欠陥の位置	共振周波数	Q
3 列目	0.26790	2012
4 列目	0.26745	2651
5 列目	0.26735	3885
6 列目	0.26733	4666

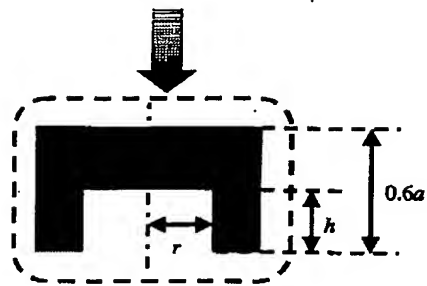
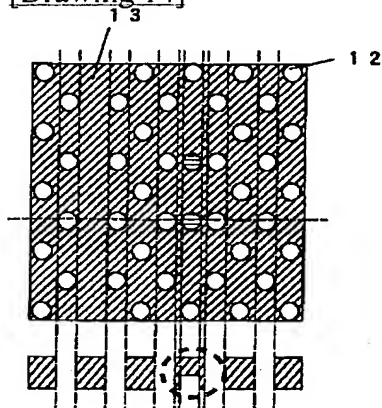
[Drawing 12]



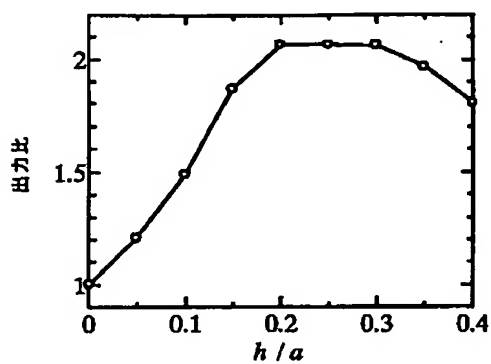
[Drawing 13]



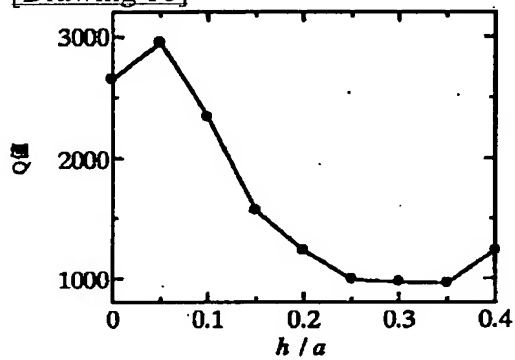
[Drawing 14]



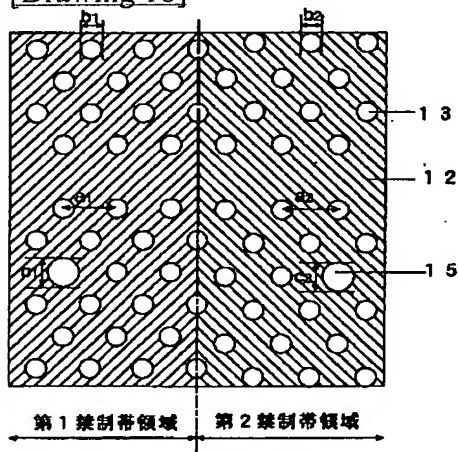
[Drawing 15]



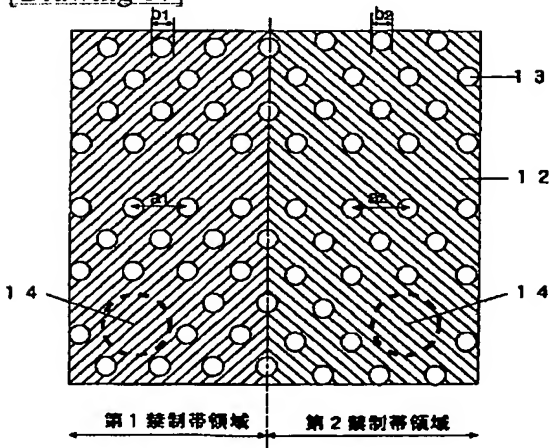
[Drawing 16]



[Drawing 18]



[Drawing 17]



[Drawing 19]

## ドナー型クラスタ欠陥

構造変化率	共鳴周波数	Q	$Q_v$	$Q_p$	$Q_p / Q_v$
-1%	$0.266649c/a_2$ (+0.69%)	2891	5039	6784	1.34
0%(参考)	$0.2675c/a_1$	2651	5769	4904	0.85
1%	$0.26849c/a_2$ (-0.62%)	2885	5206	6474	1.24

## アクセプタ型点欠陥

構造変化率	共鳴周波数	Q	$Q_v$	$Q_p$	$Q_p / Q_v$
-1%	$0.2719c/a_2=0.27462 c/a_1$	470	975	906	0.93
0%(参考)	$0.2728c/a_1$	482	1040	899	0.86
1%	$0.2738c/a_2=0.27101 c/a_1$	484	958	978	1.02

[Translation done.]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-279764

(P 2 0 0 3 - 2 7 9 7 6 4 A)

(43) 公開日 平成15年10月2日 (2003. 10. 2)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>

G02B 6/12

識別記号

F I

G02B 6/12

テーマコード<sup>\*</sup> (参考)

F 2H047

Z

審査請求 有 請求項の数17 O L (全13頁)

(21) 出願番号 特願2002-86221 (P 2002-86221)

(22) 出願日 平成14年3月26日 (2002. 3. 26)

(71) 出願人 396020800

科学技術振興事業団

埼玉県川口市本町4丁目1番8号

(72) 発明者 野田 進

京都府宇治市五ヶ庄 京大職員宿舎231号

(72) 発明者 望月 理光

長野県茅野市金沢2050番地 金沢精和荘320号室

(74) 代理人 100095670

弁理士 小林 良平 (外1名)

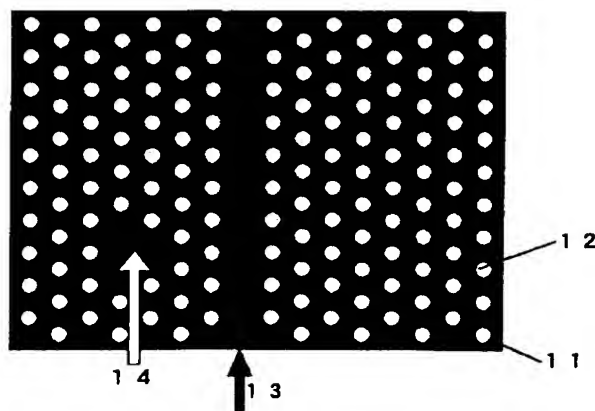
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 2次元フォトニック結晶光分合波器

(57) 【要約】

【課題】 小型化が可能であり、かつQ値及び効率の高い光分合波器を提供する。

【解決手段】 スラブ状の本体11に、本体11の材質よりも低屈折率の領域(空孔)12を周期的に配置することにより2次元フォトニック結晶を作製する。その中で空孔12を線状に設けないことにより導波路13を形成する。導波路13に隣接した場所の2個以上の格子点で空孔12を設けないことにより、ドナー型クラスタ欠陥14を形成する。このような構成により、導波路13を伝播する光のうち特定の波長の光だけがドナー型クラスタ欠陥14において共振し、捕獲されて外部へ放出される(分波)。逆に、ドナー型クラスタ欠陥14において外部から特定の波長の光だけを導波路13に投入することもできる(合波)。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 a) スラブ状の本体と、

b) 上記本体に周期的に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、

c) 上記本体において、上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路と、

d) 上記導波路の近傍に設けられる、隣接する 2 個以上の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥と、  
を備えることを特徴とする 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 2】 上記クラスタ欠陥が、隣接する 2 個の欠陥によって形成されることを特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 3】 上記クラスタ欠陥が、三角形状に隣接する 3 個の欠陥によって形成されることを特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 4】 上記クラスタ欠陥が、導波路に平行な直線状に隣接する 3 個の欠陥によって形成されることを特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 5】 直線状に隣接する 3 個の欠陥によって形成される上記クラスタ欠陥が、上記導波路から上記異屈折率領域の列の 4 列目に設けられることを特徴とする請求項 4 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 6】 a) スラブ状の本体と、

b) 上記本体内に設けられた 2 以上の禁制帯領域と、

c) 各禁制帯領域内において、各禁制帯領域毎に異なる周期で周期的に本体に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、

d) 各禁制帯領域内において上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成され、全禁制帯領域を通過するように設けられる導波路と、

e) 各禁制帯領域内において上記導波路の近傍に設けられる点状欠陥と、  
を備えることを特徴とする 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 7】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも 1 つが、隣接する 2 個以上の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項 6 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 8】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも 1 つが、隣接する 2 個の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項 7 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 9】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも 1 つが、三角形状に隣接する 3 個の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項 7 に記載の 2 次元フォトニック

結晶光分合波器。

【請求項 10】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも 1 つが、導波路に平行な直線状に隣接する 3 個の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項 7 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 11】 直線状に隣接する 3 個の欠陥によって形成される上記クラスタ欠陥が、上記導波路から上記異屈折率領域の列の 4 列目に設けられることを特徴とする請求項 10 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 12】 上記異屈折率領域の欠陥は、本体の一方の面から本体の厚みの 5%~40% の範囲の部分にのみ異屈折率領域を設けたものであることを特徴とする請求項 1~11 のいずれかに記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 13】 上記異屈折率領域の厚みが本体の厚みの 20%~30% であることを特徴とする請求項 12 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 14】 上記異屈折率領域が、本体よりも屈折率の低い領域であることを特徴とする請求項 1~13 のいずれかに記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 15】 上記低屈折率領域が空孔であることを特徴とする請求項 14 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 16】 上記異屈折率領域の欠陥が、本体に空孔を設けないことにより形成されるドナー型欠陥であることを特徴とする請求項 15 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 17】 上記異屈折率領域の欠陥が、上記空孔よりも径の大きい空孔を設けることにより形成されるアクセプタ型欠陥であることを特徴とする請求項 15 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、波長分割多重通信などに用いられる光分合波デバイスに関する。

【0002】

【従来の技術】近年、新しい光デバイスとして、フォトニック結晶が注目されている。フォトニック結晶とは周期屈折率分布をもった光学機能材料であり、光子のエネルギーに対してバンド構造を形成する。特に、光の伝播が不可能となるエネルギー領域(フォトニックバンドギャップ)が形成されることが特徴である。

【0003】フォトニック結晶の適用が期待される分野の一例として、光通信の分野を取り上げる。光通信において、従来の光時分割多重方式(Optical Time Division Multiplexing : OTDM)に代わって、波長分割多重方式(Wavelength Division Multiplexing : WDM)が用いられている。この WDM は、一本の伝送路に複数の波長の光を



伝播させ、それぞれに別個の信号を乗せる通信方式である。これによって、単位時間に送信できる情報量が飛躍的に向上する。

【0004】この波長分割多重方式においては、伝送路の入口側で各波長の光を混合し、混合された光を出口側で各波長ごとに取り出す。そのために、光の合波器及び分波器、あるいは波長フィルタが必要となる。このうち分波器として、現状ではアレイ導波路回折格子(Arrayed Waveguide Grating : AWG)が用いられている。しかし、AWGでは通常の導波路を用いるので、光の損失を小さくするために、現状では数cm角程度の比較的大きな素子が用いられている。

【0005】そこで、フォトニック結晶から成るデバイスを上記分波器及び合波器として用いることにより、上記分波器の小型化を図ることが検討されている(例えば、特開2001-272555号公報に記載。以下、従来技術1とする。)。以下に、フォトニック結晶から成る分波器について簡単に述べる。フォトニック結晶中に適切な欠陥を導入することにより、上記フォトニックバンドギャップ中にこの欠陥によるエネルギー準位(欠陥準位)が形成される。これによって、上記フォトニックバンドギャップ中のエネルギーに対応する波長範囲のうち、欠陥準位のエネルギーに対応する波長の光のみが存在可能になる。結晶中の上記欠陥を線状にすれば光導波路となり、結晶中の欠陥を点状にすれば光共振器となる。

【0006】フォトニック結晶中に上記導波路を設け、その近傍に上記点欠陥を適切に設ければ、様々な波長の光が導波路内を伝播し、その内の、点欠陥の共振周波数に一致する波長の光のみが点欠陥に捕獲される。その光を取り出せば、所望の波長の分波器となる。逆に、共振周波数に一致する波長の光を点欠陥からフォトニック結晶内に導入し、他の様々な波長の光と一緒に導波路内を伝播させれば、所望の波長の合波器となる。

【0007】分波器及び合波器としてのフォトニック結晶には、2次元結晶あるいは3次元結晶を用いることができる。その両者にそれぞれ特長があるが、以下では、作成が比較的容易な2次元結晶について述べる。2次元フォトニック結晶では、面に直交する方向(面直方向)には結晶本体と空気との大きな屈折率の差があるので、光を面直方向に対して閉じこめることができる。

【0008】上記従来技術1において、InGaAsPから成るスラブに周期的に同じ直径の円柱孔を開け、その円柱孔の1列を塞ぐことで光導波路とし、さらに少なくとも1箇所の円柱孔の直径を他の円柱孔の直径と異なるものとすることで欠陥を導入して、それを光共振器とした場合について検討されている。

【0009】それによれば、伝播させたい光の波長(上記実施例では、波長分割光多重通信に一般的に用いられる波長帯のひとつである $1.55\mu\text{m}$ )に合わせて格子定数 $a$ を設定する。そして、各格子点に設けた円柱孔の半径を

$0.29a$ とする。そのうち1個の円柱孔の半径を $0.56a$ とすることにより、そこに点欠陥を形成する。すると、その点欠陥からスラブの面直上下方向に規格化周波数 $f=0.273$ の光が放射される。この時のQ値はおおよそ500となる。ここで、規格化周波数とは、光の周波数に $a/c$ ( $c$ は光速)を乗じて無次元としたものである。Q値は共振器の効率を示す値であり、Q値が大きいほど波長分解能も高くなる。また、1個の円柱孔の半径を $0.56a$ 、別の1個の円柱孔の半径を $0.58a$ と、大きさの異なる複数の点欠陥を形成した場合、それぞれ規格化周波数が $0.2729$ 及び $0.2769$ と、波長の異なる2種の光が放射される。その時のQ値はいずれもおおよそ500となる。

#### 【0010】

【発明が解決しようとする課題】上で述べたように、上記従来技術1において2次元フォトニック結晶を光分波器として使用できることが示されているが、そこで得られている性能について、以下の点でさらに向上させる必要がある。まず、Q値について述べる。上記従来技術1においてQ値はおおよそ500である。この値から、波長 $\lambda$ の光における光共振器の波長分解能が $\lambda/Q$ で求められる。例えば、 $1.55\mu\text{m}$ 帯の波長における上記光共振器の波長分解能は約3nmとなる。しかし、高密度波長分割多重方式の光通信に用いるためには、波長分解能をおおよそ $0.8\text{nm}$ 以下、Q値をおおよそ2000以上にしなければならない。従来技術1においてQ値を向上させることに対する障害要因として、点欠陥を導入することによって面直方向への光のエネルギーの損失が増大することが考えられる。

【0011】2次元面の片側の面からのみ光を取り出すために点欠陥に上下非対称性を導入することがある(従来技術1)。また、円形の点欠陥から取り出される光は無偏光であるが、外部の光学系と結合させることなどの目的により、直線偏光した光が求められることがある。そこで、偏光波を取り出すために点欠陥に面内方向の非対称性が導入されることがある。しかし、点欠陥の非対称性もQ値が低下する原因となる。

【0012】本発明はこのような課題を解決するために成されたものであり、その目的とするところは小型化が可能であり、かつQ値の高い、すなわち効率の高い光分合波器を得ることにある。また、上下非対称性を導入した場合や偏光波を得る場合にも効率の高い光分合波器を得ることも目的とする。

#### 【0013】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために成された本発明に係る2次元フォトニック結晶光分合波器の第1の態様のものは、

- a) スラブ状の本体と、
- b) 上記本体に周期的に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、
- c) 上記本体において、上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路と、

d) 上記導波路の近傍に設けられる、隣接する 2 個以上の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥と、を備えることを特徴とする。

【0014】また、本発明に係る 2 次元フォトニック結晶光分合波器の第 2 の態様のものは、

a) スラブ状の本体と、

b) 上記本体内に設けられた 2 以上の禁制帯領域と、

c) 各禁制帯領域内において、各禁制帯領域毎に異なる周期で周期的に本体に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、

d) 各禁制帯領域内において上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成され、全禁制帯領域を通過するように設けられる導波路と、

e) 各禁制帯領域内において上記導波路の近傍に設けられる点状欠陥と、を備えることを特徴とする。

【0015】

【発明の実施の形態】まず、第 1 の態様について説明する。面内方向の大きさに比べて厚さが十分薄い板状体であるスラブが、本発明の 2 次元フォトニック結晶光分合波器の本体となる。この本体に、本体とは屈折率の異なる領域を周期的に配置する。この周期的な異屈折率領域の存在によりフォトニックバンドギャップが形成され、その範囲内のエネルギーを持つ光を存在させなくする。すなわち、それに対応する波長帯の光は本体を通過することができない。

【0016】異屈折率領域は、本体よりも屈折率の低いもの及び高いもののいずれであってもよい。一般に、本体としては屈折率の高い材質が用いられることが多いので、異屈折率領域としては屈折率の低い材質のものをを用いるのが材料選択の点からも容易である。

【0017】更に、低屈折率領域としては、本体よりも屈折率の低い物質を本体内に埋め込んだものでもよいし、単に本体に孔を開けただけのものでもよい。後者の場合は、空気が上記異屈折率領域となる。實際上、空気が最も屈折率の低い材質であるため、本体との屈折率差を大きくすることができるという点で有利である。また、製造上も、他の物質を埋め込むよりも単に空孔を設ける方が容易である。

【0018】以下、異屈折率領域が配置される周期的な点を格子点と呼ぶ。格子点の配列としては種々の形態が考えられるが、例えば正方格子状や三角格子状などが典型的なものである。

【0019】このような周期性を有するフォトニック結晶において、1 個の格子点の異屈折率領域に欠陥を設けることにより、そこで周期性が乱される。欠陥のパラメータを適切に設定することにより、この周期性の乱れからフォトニックバンドギャップ中に欠陥準位が形成され、光の存在が許されない本体中に光の存在が許される点が生ずる。これを点欠陥と呼ぶ。このような欠陥を線状に設けることにより、本体中に光が通過し得る導波路

を形成することができる。これを線欠陥と呼ぶ。線欠陥の形状は直線状に限らず、屈曲状や曲線状であってもよい。また、線欠陥の幅は格子点の列の 1 列分であってもよいし、複数列分であってもよい。

【0020】上記のように、異屈折率領域を空孔とした場合、その欠陥としては、空孔を本体の物質で埋めたもの、すなわち、その格子点に空孔を設けないもの、が最も便利である。もちろん、その空孔の径を大きくしたものも欠陥となる。格子点に空孔を設けないものはドナー型欠陥であり、空孔の径を大きくしたものはアクセプタ型欠陥である。

【0021】ここで、ドナー型欠陥とアクセプタ型欠陥について説明する。本発明では赤外線及び紫外線を含む光を対象としているため、屈折率で説明しているが、一般的にはフォトニック結晶は周期的な誘電率の差により形成される。従って、欠陥は、本体中に周期的に配置された異誘電率領域（格子点）の 1 個の誘電率を異なるものとするにより形成される。誘電率を通常の格子点の誘電率よりも高い値にしたものをドナー型欠陥、低い値にしたものをアクセプタ型欠陥と呼ぶ。上記のように、何らかの物質で作製された本体中に周期的に空孔を配置し、その内の 1 点に空孔を設けない（本体物質で埋める）という欠陥は、その格子点の誘電率を空気よりも高くすることであるため、ドナー型欠陥である。逆に、1 点の孔の径を大きくすることは、その格子点の誘電率を低くすることであるため、アクセプタ型欠陥である。

【0022】異屈折率領域のうち、導波路の近傍にある、隣接する 2 個以上の格子点を欠陥とすることによって、1 個の格子点のみから成る欠陥とは別異の特性を持つ欠陥を形成する。以後、1 個の格子点のみから成る欠陥を「点欠陥」と呼ぶ。従来技術 1 に記載されている欠陥は、この点欠陥である。それに対して、本願発明の第 1 の態様で使用する欠陥は、隣接する 2 個以上の格子点により形成される欠陥である。これを「クラスタ欠陥」と呼ぶ。また、「点欠陥」と「クラスタ欠陥」とを総称して「点状欠陥」と呼ぶ。これは、後述の第 2 の態様で使用する。

【0023】このような構成において、1 個のクラスタ欠陥に含まれる格子点の個数や配列及びクラスタ欠陥の位置（導波路からの距離）、あるいは本体の格子定数  $a$  などのパラメータを適切に設定することにより、クラスタ欠陥によりフォトニックバンドギャップ中に所望の欠陥準位が形成される。そして、導波路を通過する種々の波長の光のうち、欠陥準位のエネルギーに対応する波長の光のみが欠陥位置において共振する。共振した光はフォトニック結晶の面直方向に放出される。所望の波長の光を得るためには、上記種々のパラメータを調節することによって、欠陥準位のエネルギーを適切に選ばばよい。

【0024】2 個以上の欠陥を直線状に配置して形成したクラスタ欠陥の場合、欠陥位置においてクラスタ欠陥

の幅方向の偏光が得られる。

【0025】クラスタ欠陥の形状に面直方向の非対称性を与えれば、2次元フォトニック結晶の上下に出力される光の出力を非対称にすることができる。非対称性を与えるための方法としては、本体の一方の面から本体の厚みの一部分にのみ異屈折率領域を設けることにより、異屈折率領域の欠陥とする方法が考えられる。その厚みの範囲としては、後述のように、5%~40%、特に20~30%が望ましい。

【0026】クラスタ欠陥の場合、その形状に面直方向の非対称性を与えるには、上記のように各格子点における非対称性に依る必要はない。例えば、隣接する2つの格子点から成るクラスタ欠陥に対して、その2つの格子点の中間の一点に上記操作（一方の面にのみ低屈折率領域を設ける）を行ってもよい。

【0027】ここまでは分波器としての作用を述べたが、上記構成を合波器として用いることもできる。欠陥準位のエネルギーに対応する波長の光をクラスタ欠陥の位置に導入すれば、導波路を流れる光に上記波長の光が合波される。

【0028】格子点の個数や配列が異なる2個以上のクラスタ欠陥を配置することによって、異なる2種以上の波長の光を分合波することもできる。

【0029】次に、第2の態様について説明する。第1の態様において、欠陥を設ける格子点の個数や配置を変えることによって分合波する光の波長を変えることができることを示した。そして、異屈折率領域としては空孔が有利であり、欠陥としてはその空孔を設けないというドナー型欠陥が有利であることを述べた。しかし、このようなドナー型欠陥は、空孔の径を大きくすることにより形成されるアクセプタ型欠陥よりも波長変化の自由度が小さい。これは、アクセプタ型欠陥では空孔の大きさを任意に変化させることができるのに対して、ドナー型欠陥は単に格子点を本体物質で埋めるだけであり、そのような変化の自由度がないためである。上記本発明の第1の態様に従ってドナー型欠陥をクラスタ型とすることにより、それに含まれる格子点の数又は配置の形態を変えるという自由度は生じるが、それでも自由度の幅は限られている。ドナー型クラスタ欠陥におけるこのような問題は、本発明の第2の態様によって解決される。それを以下に詳しく述べる。

【0030】本発明の第2の態様は、本体に異屈折率領域を配する際に、本体を、分合波する波長の種類の数と同じ数の領域に分ける。以後、この領域を禁制帯領域と呼ぶ。そして、各禁制帯領域毎に異なる配列周期で上記異屈折率領域を配置する。

【0031】異屈折率領域は、本体よりも屈折率の低い材質によって形成されることが好ましく、空気によって形成される（すなわち、空孔である）ことがより好ましいという点は、第1の態様と同様である。

【0032】各禁制帯領域を通して光を通過させ、合波するために、上記禁制帯領域の全てを通る導波路を第1の態様と同様に形成する。さらに、上記禁制帯領域の各々に分合波用の点状欠陥を形成する。「点状欠陥」とは上記の通り、1個の格子点のみから成る点欠陥と、複数の隣接する点欠陥で構成されるクラスタ欠陥とを含むものである。各禁制帯領域に設ける点状欠陥は、互いに共振波長が異なるようにしておく。従って、 $n$ 個の禁制帯領域で構成される2次元フォトニック結晶光分合波器は、 $n$ 種類の波長の光を分合波する。このように、1つの2次元フォトニック結晶に複数の禁制帯領域を設けた構造を、面内ヘテロ構造と呼ぶ。

【0033】各禁制帯領域における異屈折率領域の配列周期と点状欠陥は、分合波する光の波長に対応して設定する。各禁制帯領域毎の異屈折率領域の大きさの比率も、設定した各禁制帯領域毎の異屈折率領域の配列周期と同じ比率とする。各禁制帯領域に同じ形状のクラスタ欠陥を配置すれば、禁制帯領域毎の異屈折率領域の配列周期の違いによって、各クラスタ欠陥は異なる波長を分合波する。もちろん、禁制帯領域毎に異なる格子点数又は形状のクラスタ欠陥を配置してもよい。クラスタ欠陥には第1の態様の種々の欠陥が使用可能である。

【0034】本発明の第2の態様は、特に、本体の周期構造である空孔を設けないというドナー型欠陥の場合に自由度を大きくするという目的で開発されたものであるが、この構成自体はアクセプタ型にも適用することができる。それに特有の利点を持つ。すなわち、1個の格子点の空孔径を大きくすることにより形成されるアクセプタ型点欠陥を用いて異なる2種以上の波長の光を分合波しようとする場合、従来は1枚の本体内に径の異なる複数の空孔を導入していたが、これによって $Q$ 値が低下するという問題があった。この $Q$ 値の低下を回避するために、本発明の第2の態様を好適に適用することができる。すなわち、異なる禁制帯領域に、分合波する光の波長に対応して異なる配列周期で異屈折率領域を配置する。各禁制帯領域毎の異屈折率領域の大きさの比率、及び各禁制帯領域毎に配置するアクセプタ型点欠陥の大きさも、設定した各禁制帯領域毎の異屈折率領域の配列周期の比率と同じ比率とする。これにより、 $Q$ 値の低下を招くことなく、複数の波長の光を分合波することが可能となる。

【0035】

【発明の効果】上記第1の態様のクラスタ欠陥を導入することによって、1個の格子点のみから成る点欠陥を用いる場合よりも高い $Q$ 値を持つ分波器及び合波器を得ることができる。これは、クラスタ欠陥が形成されることにより、欠陥の周囲における有効屈折率が高くなり、光の閉じこめ効果が向上することによる。また、上下非対称性を導入した場合や偏光波を得る場合にも効率の高い光分合波器を得ることができる。

【0036】上記第2の態様の面内ヘテロ構造を導入することによって、ドナー型クラスタ欠陥を使用した場合においても、複数の波長の光を分合波する際の各波長を高い自由度で設定することができる。また、そのときのQ値は、1種類の波長の光を分合波するフォトニック結晶のQ値とほとんど変わらない。高いQ値を持つ第1の態様のドナー型クラスタ欠陥を用いて第2の態様を構成すれば、高いQ値を持ち、かつ光の波長を分合波する装置を比較的容易に作製することができる。また、第2の態様はアクセプタ型欠陥に対しても有効に応用することが

【0037】

【実施例】(1)第1の態様の実施例

(1-1)構成

まず、第1の態様の実施例として、図1に模式的に示すような2次元フォトニック結晶を取り上げる。図1に板状に表したものがスラブ(本体)11である。光通信に用いる波長 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ の赤外線考えた場合、スラブ11にはそれに対して透明なInGaAsPを用いることができる。そこに、白丸で示すように、異屈折率領域(低屈折率領域)である空孔12を周期的に配置する。図1では三角格子状に空孔12を配した例を示しているが、その他にも正方格子状などの様々な配置が考えられる。

【0038】導波路13は、図1の実線の矢印で示した部分において空孔を線状に連続的に設けないことにより形成される。さらに白矢印で示した部分において複数の格子点に空孔を設けないことによって、ドナー型クラスタ欠陥14が形成される。図のうえでは、空孔で構成される格子点を本体物質で埋めたように表されるので、以

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} \frac{\partial H_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} \frac{\partial H_z}{\partial y} \right] + \frac{\omega^2}{c^2} H_z = 0 \quad (1)$$

と表される。ここで $\omega$ は光の角振動数、 $H_z = H_z(x, y, \omega)$ は面内における $z$ 方向の磁界( $H_x$ 、 $H_y$ は0)、 $c$ は光速である。また、 $\epsilon_r(\mathbf{r})$ はここでは周期的な誘電率を表す。 $\epsilon_r(\mathbf{r})$ をフーリエ級数展開し、 $H_z(x, y, \omega)$ をブロッホ

$$\frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} = \sum_{\mathbf{G}} \kappa(\mathbf{G}) \exp\{j\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}\} \\ H_z(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \exp\{j(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}\} \quad (2)$$

となる。ただし、 $\mathbf{k}$ は波数ベクトルであり、 $\mathbf{G}$ は逆格子ベクトルである。また、 $\kappa(\mathbf{G})$ 及び $h(\mathbf{k}, \mathbf{G})$ はそれぞれ展開係数である。式(2)を式(1)に代入し、任意の $\mathbf{G}$ に対する $h$

$$\sum_{\mathbf{G}'} (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}') \kappa(\mathbf{G} - \mathbf{G}') h(\mathbf{k}, \mathbf{G}') = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \quad (3)$$

となる。したがって、特定の波数ベクトル $\mathbf{k}$ を与えると固有値として $(\omega/c)^2$ が求められ、対応する周波数、すなわち対応するエネルギーが定まる。様々な波数ベクトル

下では、ドナー型クラスタ欠陥を構成することを「格子点を埋める」と表現することがある。

【0039】図1においては3格子点を埋めたドナー型クラスタ欠陥の例を示したが、その他にも、図2に示すような様々なドナー型クラスタ欠陥の構成が考えられる。図2には、格子点を2〜3個埋めた場合の構成を示した。図には示さないが、4格子点以上を埋めたドナー型クラスタ欠陥も可能である。格子点を3個埋めた場合については3通りの構成を示している。このうち、欠陥を構成する3つの格子点が三角形に並ぶものを「三角形状欠陥」、直線上に並ぶものを「直線状欠陥」と呼ぶことにする。なお、図2には比較のために格子点1個だけで構成されるドナー型欠陥(ドナー型点欠陥)も示した。

【0040】(1-2)光分合波できることの確認

上記構成によって実際に光を分合波できるかどうかを確認する。そのためにまず、導波路が通すフォトニックバンドギャップ中の光の波長帯を調べ、次にその光の波長帯の中にドナー型欠陥によって欠陥準位が形成されるかどうかを調べる。その手段として、2次元平面波展開法と呼ばれる解析手法を用いた。

【0041】平面波展開法とは、誘電率分布が周期構造をもつ空間を伝播する光を、平面波の合成として表す方法である。電界が面内方向に振動し磁界が面直方向に振動するTEモードを考えると、電磁気のマクスウェル方程式は磁界について、

【0042】

【数1】

の定理により展開すると、それぞれ、

【0043】

【数2】

( $\mathbf{k}, \mathbf{G}$ )について解くと、

【0044】

【数3】

ル $\mathbf{k}$ に対応する周波数 $\omega$ を求めることで、フォトニックバンド構造が計算される。

【0045】式(3)を用いて、まず導波路を有し点欠陥

を持たない 2 次元フォトニック結晶に対して、TEモードについて導波路を伝播する周波数領域を計算した結果を図 3 に示す。なお、図 3 の右図は左図の一部を拡大したものである。図 3 より、0 次モード(図中の黒丸)と 1 次モード(同白丸)の 2 つの導波モードが伝播可能であるが、単一モードであること及び外部の系との兼ね合いから、0 次モードの方が効率が良くと考えられる。また、図中に「ライトライン」と記された実線よりも高周波側の光は、自由空間に存在する同じ周波数で同じ面内波数をもつモードに結合して上下方向に漏れ出してしまい、伝播効率が低下する。以上より、図 3 の右図に黒丸と細実線で示した、規格化周波数 0.267~0.280 の範囲の光が最も効率よく当該導波路を伝播すると考えられる。言い換えれば、所望の光の周波数が規格化周波数 0.267~0.280 の範囲に入るように格子定数  $a$  を決定すればよい。例えば、本体の材質として InGaAsP を使用し、波長  $1.55\mu\text{m}$  の光を用いるものとして計算した場合、上記規格化周波数の範囲から格子定数  $a$  を  $0.42\sim 0.43\mu\text{m}$  とすればよいことがわかる。

【0046】図 2 に示した欠陥のうち、格子点を 2 個埋めたものと、三角形及び直線状に 3 個埋めたクラスタ欠陥について、それぞれ欠陥準位を計算した。また、比較のために格子点を 1 個だけ埋めたドナー型点欠陥についても計算を行った。それらの結果を図 4~図 7 に示す。まず、比較例であるドナー型点欠陥の場合は、図 4 のように、上記の導波路を伝播する周波数領域 0.267 $c/a$ ~0.280 $c/a$ (以後、利用可能周波数域と称する)の間に欠陥準位が形成されないため、分合波器としては用いることができない。

【0047】それに対して、隣接する 2 個の格子点を埋めたクラスタ欠陥の場合は、図 5 のように利用可能周波数域に欠陥準位が 1 つだけ形成されるため、分合波器として用いることができる。3 個の格子点を三角形に埋めたクラスタ欠陥の場合は、図 6 のように利用可能周波数域に欠陥準位が複数形成されるが、そのうち規格化周波数 0.268 $c/a$  付近にある欠陥準位は単一であり、かつそれより高周波側の欠陥準位との間隔が十分離れているため、分合波器として用いることができる。3 個の格子点を導波路に平行な直線状に埋めたクラスタ欠陥の場合は、図 7 のように利用可能な周波数域に欠陥準位が 1 つだけ形成されるため、分合波器として用いることができる。

【0048】上記において分合波器として用いることができることが明らかになった、隣接する 2 個の格子点を埋めた場合、3 個の格子点を三角形に埋めた場合および 3 個の格子点を導波路に平行な直線状に埋めた場合について、電磁界分布を計算した結果を図 8 及び図 9 に示す。この図において、矢印は図面に平行な方向の電界ベクトルを示し、色の濃淡は図面に垂直な方向の磁界の振幅を示している。2 個の格子点を埋めた場合及び 3 個の

格子点を直線状に埋めた場合には、当該欠陥において共振する光は、埋めた格子点列に伝播するようなモードである。また、埋めた格子点列に垂直な方向の電界が強く、直線偏光に近い特性を持つと考えられる。一方、3 個の格子点を三角形に埋めた場合には、三角形の重心から各頂点に向かって伝播するような共振モードを示しており、電磁界分布の対称性が高く、偏光性が上記 2 つの場合ほどは大きくないと考えられる。

【0049】(1-3)Q 値の算出

次に、前段落で取り上げた 3 つの場合について、Q 値の計算を行った。その際、Yee のアルゴリズムによる時間領域差分法(K. S. Yee, "IEEE Trans. Antennas Propagat.", AP-14 巻 302-307 ページ)を用い、放射される電磁波の強度について欠陥準位付近における周波数依存性を計算し、そのピーク強度と半値全幅から Q 値を求めた。

【0050】2 次元フォトニック結晶における Q 値は、点欠陥と導波路との結合を表す  $Q_p$  と、点欠陥と外部(面外)との結合を表す  $Q_s$  で決まる。このうち  $Q_p$  は点欠陥と導波路との距離によって決まる。そこで、点欠陥の種類による Q 値の違いを調べるために、まず点欠陥と導波路との距離を無限大と仮定し、 $Q_s$  について計算した。その結果、2 個の格子点を埋めた場合は  $Q_s=1354$ 、3 個の格子点を三角形に埋めた場合は  $Q_s=2529$ 、3 個の格子点を直線状に埋めた場合は  $Q_s=5215$  となった。一方、従来技術 1 のアクセプタ型点欠陥について同様に  $Q_s$  を求めると 924 であった。

【0051】この結果、ドナー型クラスタ欠陥の Q 値がアクセプタ型点欠陥のそれよりも向上することが期待され、その中でも特に 3 個の格子点を直線状に埋めた場合がもっとも Q 値が高くなると期待される。そこで、3 個の格子点を直線状に埋めた場合について、 $Q_s$  及び  $Q_p$  の、点欠陥-導波路間の距離依存性を求めた結果を図 10 に示す。ここで図 10 の横軸は、空孔の列の数を単位として、格子点を直線状に埋めた列と導波路との距離を表している。Q 値は  $Q_s$  と  $Q_p$  を用いて  $1/Q=1/Q_s+1/Q_p$  で求められるため、図 10 から Q 値は図 11 のように求められる。Q 値は 2012~4666 となり、いずれも従来技術 1 の Q 値~500 よりも大幅に向上している。

【0052】図 11 によれば、点欠陥と導波路との距離が増大するにつれて Q 値は大きくなる。しかし、その距離が大きくなりすぎると、分波器の場合は点欠陥に到達する光が減少し、合波器の場合は導波路に到達する光が減少するので、分合波器としては不都合である。そこで上記距離は、Q 値と点欠陥-導波路間の光のやりとりとの兼ね合いを考慮して、適切に選ぶ必要がある。最も効率がよいと考えられるのが、 $Q_p=Q_s$  のときである。図 12 より、この条件に最も近いのは、点欠陥が、導波路から空孔列の数で 4 列目にある場合である。

【0053】前段落においては分合波器としての効率を考えたが、意図的に  $Q_p$  を大きく、 $Q_s$  を小さくすれば、導

波路を流れる特定の波長の光をわずかに取り出してモニタする、波長検出デバイスとして用いることもできる。

#### 【 0 0 5 4 】 ( 1 - 4 ) 偏光特性

( 1 - 2 ) で述べたように、 2 個の格子点を埋めた場合及び 3 個の格子点を直線状に埋めた場合には、放出光の直線偏光性が高いことが期待される。そこで、 3 個の格子点を直線状に埋めた場合について放出光の偏光特性を計算した。その結果を図 1 3 に示す。図 1 3 の横軸は埋められた格子点の列に対する面内方向の角度であり、縦軸はその角度における光の振幅に対応する。上記角度が  $0^{\circ}$  の方向では振幅がほとんど 0 になり、上記角度が  $90^{\circ}$  の方向で振幅が最大になる。すなわち、埋められた格子点の列に垂直な方向に強く偏光していることがわかる。

#### 【 0 0 5 5 】 ( 1 - 5 ) ドナー型クラスタ欠陥における上下出力割合の制御

以上においては、点欠陥は面直方向に上下対称とした。すなわち、一格点における低屈折率の物質を全て埋めた場合を考えた。この場合、面の上下方向共に、点欠陥から光が放出される。

【 0 0 5 6 】 ここでは、ドナー型クラスタ欠陥の形状に 20 図 1 4 のような上下非対称性を入れた場合について計算した。図 1 4 の例は、本体の厚さを  $0.6a$  とし、 3 個の格子点を直線状に埋め、埋められた各格子点の中間 ( 2 箇所 ) に半径  $r=0.29a$ 、深さ  $h(<0.6a)$  の孔を開けたものである。深さを格子定数で規格化した  $h/a$  と上下出力比の関係についての計算結果を図 1 5 に示す。この図に示した  $h/a$  の範囲 ( $0.05 \sim 0.4$ ) において、欠陥の上下の出力に非対称性が見られる。特に、 $h/a$  が  $0.2 \sim 0.4$  の範囲で約 2 倍強の上下出力比が得られていることが分かる。また、 $h/a$  と  $Q$  値の関係を図 1 6 に示す。上下出力比が大きい領域で  $Q$  値の低下が見られるが、それでも従来技術 1 よりも高い  $Q$  値が得られた。

#### 【 0 0 5 7 】 ( 2 ) 第 2 の態様の実施例

第 2 の態様の実施例として、面内ヘテロ構造の構成例を図 1 7 に示す。この図は 2 つの禁制帯領域から成る面内ヘテロ構造を表している。図中央の一点鎖線を境に、空孔 ( 低屈折率物質 ) の配列周期が  $a_1$  である結晶と同周期が  $a_2$  である結晶が接合されて構成されている。以下、配列周期が  $a_1$  の禁制帯領域を第 1 禁制帯領域、配列周期が  $a_2$  の禁制帯領域を第 2 禁制帯領域と呼ぶ。第 1 禁制帯領域における空孔の直径を  $b_1$ 、第 2 禁制帯領域における空孔の直径を  $b_2$  とする。一点鎖線の両側の導波路が同じ直線状に揃えられる。第 1 禁制帯領域及び第 2 禁制帯領域に同じ形状のドナー型クラスタ欠陥を形成する。以上の構成において、 $a_1/a_2$  と  $b_1/b_2$  を等しくする。ドナー型クラスタ欠陥の大きさは空孔の配列周期によって決まるので、第 1 禁制帯領域のドナー型クラスタ欠陥の大きさと第 2 禁制帯領域ドナー型クラスタ欠陥のドナー型クラスタ欠陥の大きさの比も  $a_1/a_2$  と等しい。

【 0 0 5 8 】 なお、ここではドナー型クラスタ欠陥の例

を示したが、点欠陥は図 1 8 に示すようなアクセプタ型点欠陥でもよい。この場合、第 1 禁制帯領域に直径  $c_1$  の 1 個のアクセプタ型点欠陥、第 2 禁制帯領域に直径  $c_2$  の 1 個のアクセプタ型点欠陥を設ける。 $a_1/a_2$ 、 $b_1/b_2$ 、 $c_1/c_2$  は全て等しくする。

【 0 0 5 9 】 図 1 7 および図 1 8 の構造について、 $a_1$  と  $a_2$  が等しい場合、 $a_1$  が  $a_2$  よりも 1% 大きい場合及び  $a_1$  が  $a_2$  よりも 1% 小さい場合について  $Q$  値を計算した。ここで  $\pm 1\%$ 、計 2% の構造の違いは、 $1.55 \mu\text{m}$  帯において 30nm の共鳴波長の違いに相当する。本計算においては、 $b_1=0.29$

$a_1$ 、 $b_2=0.29a_2$ 、 $c_1=0.54a_1$ 、 $c_2=0.54a_2$  とした。 $Q$  値の計算結果を図 1 9 に示す。図 1 7 および図 1 8 では、 $(1-a_2/a_1)$  を構造変化率と定義して用いた。ドナー型クラスタ欠陥を用いた場合は、 $Q$  値が 2885 ~ 2891 となり、十分大きな値が得られている。アクセプタ型点欠陥を用いた場合は、従来技術 1 のアクセプタ型の 2 次元フォトニック結晶の  $Q$  値と同程度の値が得られた。構造の違いによる大きな  $Q$  値の低下は見られない。

#### 【 0 0 6 0 】 ( 3 ) 本発明第 1 及び第 2 の態様の 2 次元フォトニック結晶の製造方法の例

2 次元フォトニック結晶の製造方法については、上記従来技術 1 に関して、低屈折率物質として空気を用いる場合の製造方法が特開 2001-272555 号公報の [0037] ~ [0044] に開示されている。まず、その方法を簡単に説明する ( 詳細は上記公報を参照 ) 。基板上に本体となるスラブの材質の結晶を成長させ、スラブを形成する。目的とする光の波長帯が  $1.55 \mu\text{m}$  帯の場合は、例えば  $\text{InGaAsP}$  をスラブの材質に用いることができる。スラブの面上にフォトリジストを塗布し電子線を照射することにより、低屈折率物質及びアクセプタ型点欠陥に対応するパターンを描画する。その面をガスエッチングすることによって低屈折率物質及びアクセプタ型点欠陥が形成される。

【 0 0 6 1 】 本発明の第 1 の態様の 2 次元フォトニック結晶を製造する場合には、上記製造方法において、パターンを描画する際にドナー型クラスタ欠陥を配置する個所に電子線を照射しないことによって、ドナー型クラスタ欠陥を導入する。また、本発明の第 2 の態様の面内ヘテロ構造を導入する場合にも、それに対応したパターンを描画すればよい。

#### 【 図面の簡単な説明】

【 図 1 】 本発明の第 1 の態様である、ドナー型クラスタ欠陥を持つ 2 次元フォトニック結晶の模式図。

【 図 2 】 ドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【 図 3 】 導波路を導波する光の周波数帯を示す図。

【 図 4 】 格子点を 1 個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【 図 5 】 格子点を 2 個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【 図 6 】 格子点を三角形に 3 個埋めたドナー型クラ

スタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図 7】 格子点を直線状に 3 個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図 8】 格子点を 2 個埋めたドナー型クラスタ欠陥の周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図 9】 格子点を 3 個埋めたドナー型クラスタ欠陥の周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図 10】 欠陥位置と  $Q_p$  及び  $Q_s$  の関係を示すグラフ。

【図 11】 欠陥位置と  $Q$  値との関係を示す表。

【図 12】 欠陥位置と  $Q_p/Q_s$  の関係を示すグラフ。

【図 13】 格子点を直線状に 3 個埋めたドナー型クラスタ欠陥の偏光特性を示すグラフ。

【図 14】 上下非対称なドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【図 15】 点欠陥に開けられた孔の深さ  $h$  と光の上下

出力比の関係を示すグラフ。

【図 16】 点欠陥に開けられた孔の深さ  $h$  と共振器の  $Q$  値の関係を示すグラフ。

【図 17】 アクセプタ型点欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

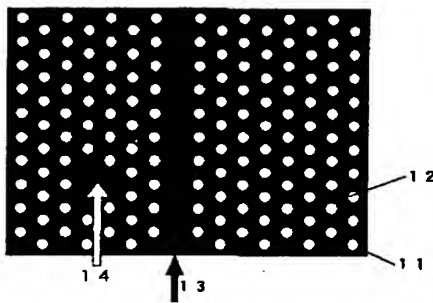
【図 18】 ドナー型クラスタ欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

【図 19】 面内ヘテロ構造と  $Q$  値との関係を示す表。

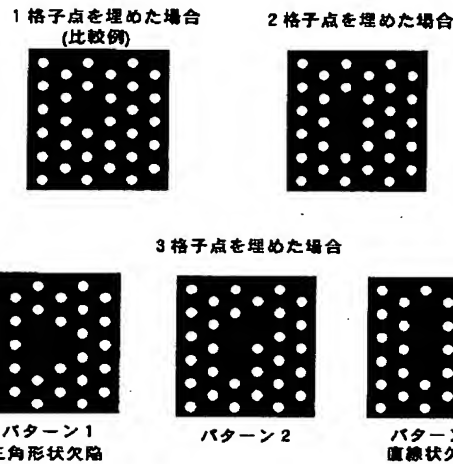
【符号の説明】

- 10 1 1…本体  
1 2…空孔  
1 3…導波路  
1 4…ドナー型クラスタ欠陥  
1 5…アクセプタ型点欠陥

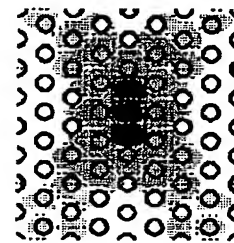
【図 1】



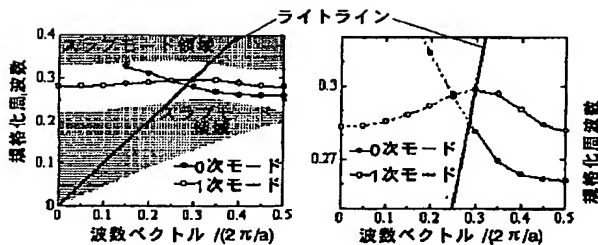
【図 2】



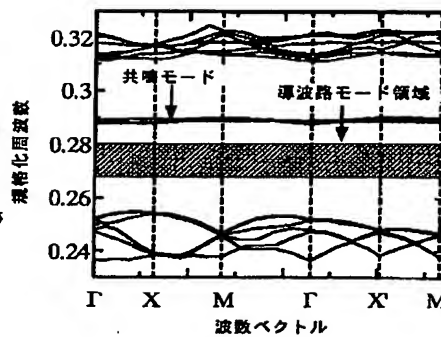
【図 8】



【図 3】

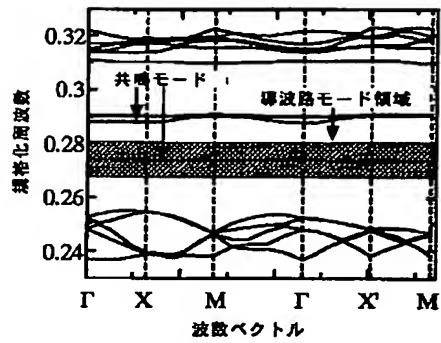


【図 4】

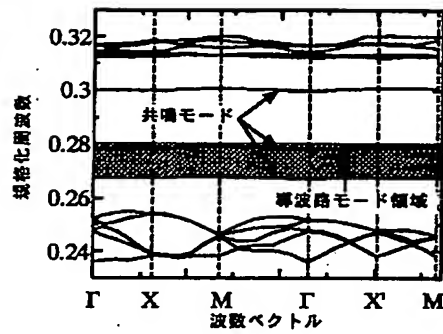




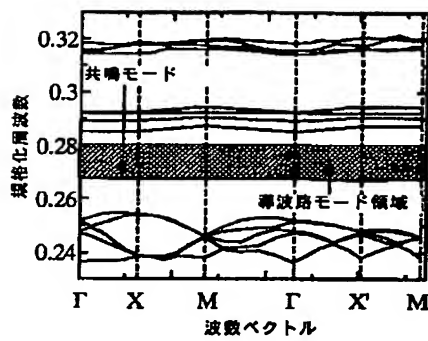
【図 5】



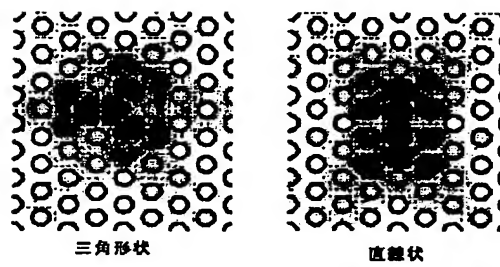
【図 6】



【図 7】



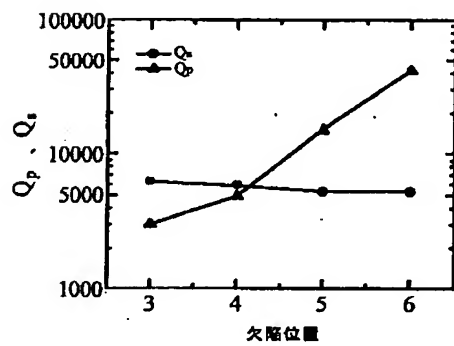
【図 9】



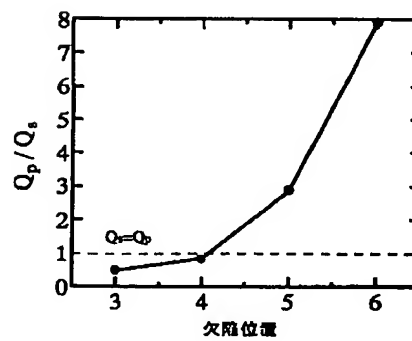
【図 11】

欠陥の位置	共振周波数	Q
3 列目	0.26790	2012
4 列目	0.26745	2651
5 列目	0.26735	3885
6 列目	0.26733	4666

【図 10】

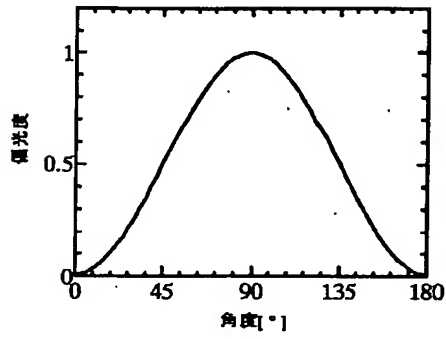


【図 12】

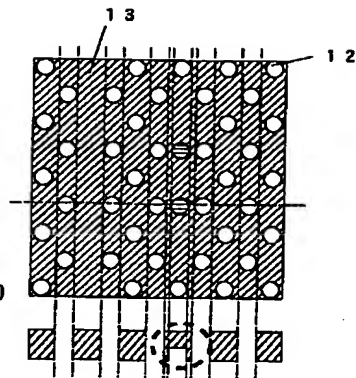




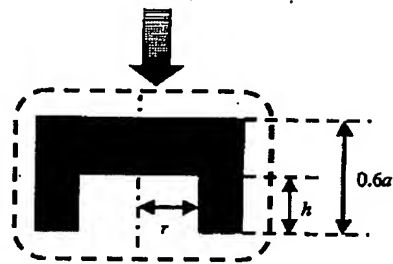
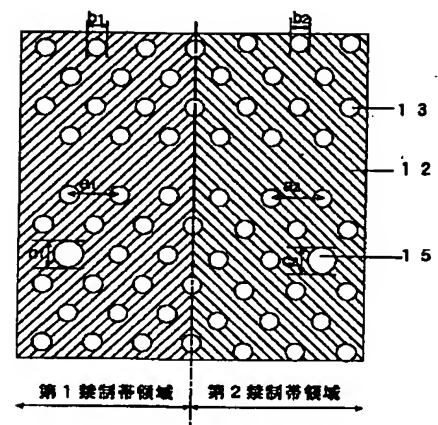
【図13】



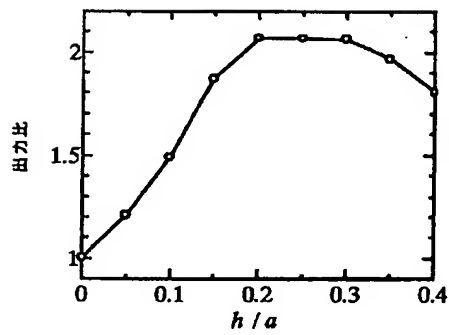
【図14】



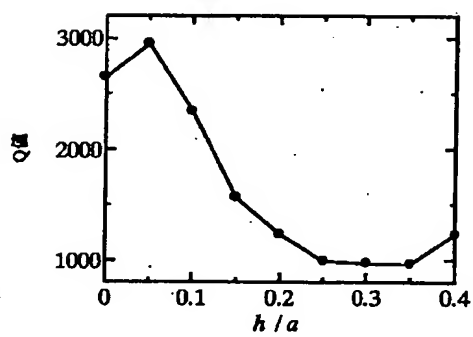
【図18】



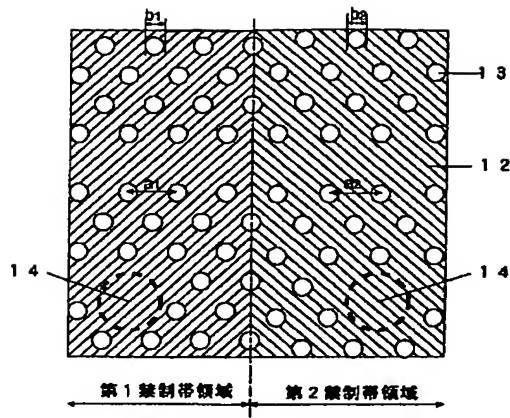
【図15】



【図16】



【図 17】



【図 19】

## ドナー型クラスタ欠陥

構造変化率	共鳴周波数	Q	$Q_v$	$Q_p$	$Q_p/Q_v$
-1%	$0.266649c/a_2$ (+0.69%)	2891	5039	6784	1.34
0%(参考)	$0.2675c/a_1$	2651	5769	4904	0.85
1%	$0.26849c/a_2$ (-0.62%)	2885	5206	6474	1.24

## アクセプタ型点欠陥

構造変化率	共鳴周波数	Q	$Q_v$	$Q_p$	$Q_p/Q_v$
-1%	$0.2719c/a_2=0.27462c/a_1$	470	975	906	0.93
0%(参考)	$0.2728c/a_1$	482	1040	899	0.86
1%	$0.2738c/a_2=0.27101c/a_1$	484	958	978	1.02

## 【手続補正書】

【提出日】平成14年7月18日（2002. 7. 18）

## 【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】図面の簡単な説明

【補正方法】変更

【補正内容】

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第1の態様である、ドナー型クラスタ欠陥を持つ2次元フォトニック結晶の模式図。

【図2】 ドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【図3】 導波路を導波する光の周波数帯を示す図。

【図4】 格子点を1個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図5】 格子点を2個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図6】 格子点を三角形に3個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図7】 格子点を直線状に3個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図8】 格子点を2個埋めたドナー型クラスタ欠陥の周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図9】 格子点を3個埋めたドナー型クラスタ欠陥の

周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図10】 欠陥位置と $Q_p$ 及び $Q_s$ の関係を示すグラフ。

【図11】 欠陥位置と $Q$ 値との関係を示す表。

【図12】 欠陥位置と $Q_p/Q_s$ の関係を示すグラフ。

【図13】 格子点を直線状に3個埋めたドナー型クラスタ欠陥の偏光特性を示すグラフ。

【図14】 上下非対称なドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【図15】 点欠陥に開けられた孔の深さ $h$ と光の上下出力比の関係を示すグラフ。

【図16】 点欠陥に開けられた孔の深さ $h$ と共振器の $Q$ 値の関係を示すグラフ。

【図17】 ドナー型クラスタ欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

【図18】 アクセプタ型点欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

【図19】 面内ヘテロ構造と $Q$ 値との関係を示す表。

【符号の説明】

1 1…本体

1 2…空孔

1 3…導波路

1 4…ドナー型クラスタ欠陥

1 5…アクセプタ型点欠陥

---

フロントページの続き

(72)発明者 浅野 卓  
京都市山科区安朱東海道町16の1 緑山荘  
A-207

Fターム(参考) 2H047 KA02 KB08 LA18 PA02 PA15  
PA24 QA02 RA08